

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de génie  
Département de génie électrique et de génie informatique

AUTOMATISATION D'UN ÉQUIPEMENT  
EXPÉRIMENTAL D'ANALYSES  
MÉTALLOGRAPHIQUES 3D DE C4  
SANS-PLOMB

Mémoire de maîtrise  
Spécialité : génie électrique

Patrick GIRARD

Sherbrooke (Québec) Canada

Avril 2021



# MEMBRES DU JURY

Julien SYLVESTRE

---

Directeur

François MICHAUD

---

Codirecteur

Alexandre GIRARD

---

Évaluateur

François FERLAND

---

Évaluateur





# RÉSUMÉ

Le procédé de puce retournée est une technique d'assemblage de semi-conducteurs réalisant les interconnexions électriques et mécaniques entre une puce et son substrat à l'aide de billes de brasure connues sous le nom de C4 (*Controlled Collapse Chip Connection*). À l'heure actuelle, les fabricants de composants microélectroniques font faces à des défis techniques de taille en ce qui concerne la fabrication de composants microélectroniques avec des interconnexions sans-plomb. Lors du processus d'assemblage, d'importantes contraintes mécaniques sont observables au niveau de l'interface de ces brasures ce qui contribue à certaines types défaillances. Plusieurs études ont démontré que la géométrie et l'orientation des domaines cristallographiques (grains) d'un C4 de type SAC (étain-argent-cuivre) ont une grande influence sur ses propriétés physiques. La corrélation des caractéristiques des grains sur le comportement des brasures sans-plomb est fondamentale afin d'optimiser la fiabilité des composants lors des différentes étapes du processus d'assemblage.

Pour répondre à cet enjeu, un projet de recherche antérieur a élaboré le concept d'un système automatisé capable d'extraire des informations tridimensionnelles de la micro-structure des grains de C4 sans-plomb d'un composant microélectronique. Le concept de cet équipement automatise une méthode de coupes en série avec un système de caractérisation personnalisé de microscopie optique à lumière polarisante et sondage de surface. Le projet présenté dans ce mémoire constitue la succession de ce travail de recherche et se rapporte à l'automatisation et à la mise en marche de cet outil.

Ce mémoire présente les travaux d'analyses, de conception, d'intégration et de validation qui ont permis de compléter les différentes parties opératives et logiques de l'outil expérimental. Pour intégrer tous les composants fonctionnels, et réaliser les nombreuses fonctions de ce système, le projet a eu à étudier le processus métallographique à automatiser et les composants préalablement sélectionnés pour ensuite développer un automatisme adapté. À sa version finale, le système automatisé tire profit de plusieurs technologies, infrastructures, langages de programmation et modèles architecturaux modernes, faisant de lui un système logique distribué, modulaire, sécuritaire et unique en son genre.

Cet ouvrage présente la structure fonctionnelle des différentes unités opératives et logiques qui composent le système automatisé. Il discute des nombreuses fonctionnalités réalisées par l'application de contrôle ainsi que les choix technologiques afférents. La recherche démontre qu'elle a réussi à avancer l'équipement à un niveau opérationnel et sécuritaire pour permettre à des utilisateurs de s'en servir. L'évaluation de la performance des séquences automatisées du cycle métallographique final, les diverses expériences et données expérimentales, et la rédaction d'une procédure d'utilisation détaillée appuient cette dernière allégation. Enfin, ce mémoire conclut avec la validation des critères de performance établis lors de la précédente recherche et propose même quelques pistes de solution afin d'optimiser l'efficacité, la qualité et la performance de production du système final.

**Mots-clés :** Système automatisé, métallographie 3D, coupes en série, microscopie à lumière polarisante, C4.



Je dédie ce mémoire à ma bien-aimée et mon ange Gabrielle, à mes parents, à mes nièces adorées Charlotte et Adèle, qui ont vu le jour durant ce travail, à ses parents Maxime et Sabrina ainsi qu'à mes amours à quatre pattes Freja et Maya.



# REMERCIEMENTS

Je tiens à dédier ces quelques lignes pour remercier toutes les personnes qui ont contribué et qui m'ont aidé à compléter ce projet de maîtrise.

D'abord, je tiens à exprimer toute ma gratitude à ma conjointe Gabrielle Leblanc pour sa patience, son soutien moral exemplaire et de m'avoir appris à combiner travail, famille et plaisirs de la vie. Je remercie du fond du cœur mes parents et ma parenté proche pour leurs encouragements et les nombreux services rendus tout au long de ce parcours.

Ensuite, j'aimerais exprimer toute ma reconnaissance à mes directeurs de recherche Julien Sylvestre et François Michaud pour leur confiance, leur encadrement, leurs conseils constructifs et leurs savoir-faire exceptionnels sans qui je n'aurais pas pu réaliser ce projet. J'ai adoré travailler conjointement avec ces deux professeurs et ils méritent tous deux mon admiration la plus sincère.

Pour continuer, j'aimerais dire un gros merci à Dominique Langlois-Demers, brillant inventeur de l'équipement métallographique de cette recherche, pour toute son aide et son temps donné au projet malgré son horaire surchargé au C2MI. Je remercie également Myriam Samson, dans le cadre de son stage, de m'avoir donné un coup de main dans le développement de l'application de commande et aux tests initiaux de mise en marche du Métallographe 3D.

Je tiens à dire merci à mon agent de liaison d'IBM, Luc Patry, pour sa gentillesse, sa grande compréhension, sa disponibilité et ses nombreux services malgré les obstacles que le projet a rencontrés face aux politiques rigides d'IBM.

J'aimerais remercier les quelques membres du Groupe Automation d'IBM, Christian Tardif, Jean-Luc Martin et Karen Bird, pour la collaboration, la conception et la validation des plans électriques et du système de sécurité de la machine automatisée.

J'aimerais également dire un énorme merci aux techniciens de maintenance d'IBM du C2MI, Chantal Tétreault et Guy Boislard, pour leur participation dans le long processus d'assemblage électrique et mécanique de l'équipement. Merci également à Geneviève Beaulieu, du laboratoire analytique d'IBM, pour toute la matière d'œuvre de polissage fournie, son expertise et ses précieuses recommandations en la matière.

Je tiens à dire merci à Vincent Langlois d'IBM pour m'avoir fait connaître l'approche de conception pilotée par le Domaine (*Domain-Driven Design*) qui a servi de modèle pour la réalisation de l'application de commande du système.

Je remercie la Chaire de recherche CRSNG-IBM Canada Itée sur l'encapsulation innovante de puces microélectroniques pour le financement de ce projet et de mes travaux.

Finalement, je tiens à dire merci aux inventeurs de ces merveilleuses boissons telles que les cafés, les lattes, les thés Chai et les breuvages alcoolisés qui ont su me donner la motivation et le courage nécessaire pour terminer ce long travail de rédaction.



# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MÉTALLOGRAPHIE 3D</b>	<b>7</b>
2.1	Approche destructive et non destructive . . . . .	9
2.2	Tendance à l'automatisation et à la caractérisation multimodale . . . . .	11
2.3	Métallographe 3D . . . . .	12
<b>3</b>	<b>ÉTUDE CONCEPTUELLE</b>	<b>13</b>
3.1	Processus métallographique 3D . . . . .	13
3.2	Cadre du projet . . . . .	14
3.3	Analyse fonctionnelle du besoin . . . . .	15
3.3.1	Éléments du milieu extérieur (EME) . . . . .	15
3.3.2	Fonctions de service . . . . .	19
3.4	Analyse fonctionnelle technique . . . . .	23
3.4.1	Opérations et interactions utilisateur-machine . . . . .	23
3.4.2	Modes et états opérationnels . . . . .	24
3.4.3	Analyse de risques et sécurité machine . . . . .	25
3.4.4	Description fonctionnelle du système final . . . . .	27
<b>4</b>	<b>CONCEPTION DE L'AUTOMATISME</b>	<b>33</b>
4.1	Conduite et pilotage . . . . .	34
4.1.1	Architecture de l'application TwinCAT . . . . .	34
4.1.2	Structure et fonctionnement . . . . .	35
4.1.3	Application de sécurité . . . . .	36
4.1.4	Application de commandes moteurs . . . . .	37
4.1.5	Application de conduite . . . . .	38
4.2	Modules PC . . . . .	47
4.2.1	Architecture de l'application . . . . .	48
4.2.2	Noyau de l'application . . . . .	49
4.2.3	Manipulation des données métallographiques . . . . .	52
4.2.4	Interface de programmation (API) . . . . .	54
4.2.5	Couche présentation (IHM-PC) . . . . .	61
4.3	Manipulations robotisées . . . . .	61
4.3.1	Architecture de la logique de contrôle . . . . .	62
4.3.2	Machine à états . . . . .	65
4.3.3	Signaux de requête . . . . .	66
4.3.4	Modbus TCP/IP . . . . .	67
4.3.5	Manipulations robots . . . . .	69
<b>5</b>	<b>EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS</b>	<b>71</b>
5.1	Séquence de caractérisation de surface . . . . .	71

---

5.1.1	Palpage localisé et mise au point automatique . . . . .	72
5.1.2	Métallographie en polarisation croisée . . . . .	75
5.2	Séquence préparation de surface . . . . .	77
5.3	Séquence de nettoyage de surface . . . . .	80
5.4	Séquence de saisie et placement du porte-échantillon . . . . .	82
5.5	Résultat final . . . . .	83
<b>6</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>89</b>
<b>A</b>	<b>PROTOTYPE D'ANALYSES MÉTALLOGRAPHIQUES 3D</b>	<b>93</b>
A.1	Présentation générale du concept . . . . .	93
A.2	Échantillon et porte-échantillon . . . . .	95
A.3	Sous-système - Manipulation . . . . .	96
A.4	Sous-système - Préparation de surface . . . . .	96
A.5	Sous-système - Nettoyage . . . . .	97
A.6	Sous-système - Caractérisation . . . . .	98
A.6.1	Plaque mobile avec positionnement isostatique . . . . .	98
A.6.2	Système de microscopie motorisée . . . . .	99
A.7	Sous-système - Protection . . . . .	101
A.8	Sous-système - Contrôle . . . . .	101
<b>B</b>	<b>DOCUMENT GEMMA</b>	<b>103</b>
<b>C</b>	<b>CLASSIFICATION DES COMPOSANTS FONCTIONNELS</b>	<b>105</b>
<b>D</b>	<b>SCHEMAS FONCTIONNELS DES SOUS-SYSTEMES FINAUX</b>	<b>113</b>
D.1	Tableaux descriptifs . . . . .	113
D.2	Schémas fonctionnels . . . . .	117
<b>E</b>	<b>TECHNOLOGIE ADS</b>	<b>127</b>
<b>F</b>	<b>DIAGRAMMES D'ACTIVITÉ DES SÉQUENCES AUTOMATISÉES</b>	<b>131</b>
F.1	Séquence automatisée de caractérisation de surface . . . . .	131
F.2	Séquence automatisée de prépolissage et polissage . . . . .	134
F.3	Séquence automatisée de nettoyage . . . . .	136
F.4	Séquences de manipulations robotisées . . . . .	137
<b>G</b>	<b>FONCTIONNALITÉS DU MÉTALLOGRAPHES 3D</b>	<b>141</b>
<b>H</b>	<b>PROCÉDURE DE MÉTALLOGRAPHIE 3D</b>	<b>147</b>
H.1	Réalisation d'une expérience d'analyses métallographiques 3D . . . . .	147
H.1.1	Saisie et placement automatique du porte-échantillon . . . . .	148
H.1.2	Prépolissage automatisé . . . . .	149
H.1.3	Nettoyage automatisée . . . . .	149
H.1.4	Polissage automatisé . . . . .	149
H.1.5	Calibration de la position relative des effecteurs de caractérisation . . . . .	149

---



---

H.1.6	Caractérisation de surface automatisée . . . . .	150
H.2	Mise en marche du Métallographe 3D . . . . .	150
H.2.1	Réarmement du Métallographe 3D . . . . .	151
H.2.2	Démarrage des applications de contrôle . . . . .	151
H.2.3	Démarrage du mode d'opération manuel . . . . .	152
H.3	Préparation de l'échantillon et du porte-échantillon . . . . .	153
H.4	Paramétrisation initiale d'une séance de métallographie . . . . .	154
H.5	Utilisation du bras manipulateur en mode manuel . . . . .	156
H.5.1	Récupération du porte-échantillon dans la pince de préhension . . .	156
H.6	Préparation pour le prépolissage . . . . .	157
H.7	Préparation pour le polissage . . . . .	157
H.8	Mise hors route du Métallographe 3D . . . . .	158
H.9	Photos et indications . . . . .	159
 <b>LISTE DES RÉFÉRENCES</b>		 <b>165</b>

---



# LISTE DES FIGURES

1.1	Schématisation des différentes étapes du procédé d'assemblage par puce retournée . . . . .	1
1.2	Coupe transversale d'un semi-conducteur connecté à son substrat par C4 .	2
1.3	Illustrations de quelques modes de défaillances observables prématurément lors d'un assemblage par puce retournée . . . . .	3
1.4	Méthode généralisée et simplifiée pour la conception d'un système automatisé	5
2.1	Deux approches pour la caractérisation 3D d'un échantillon métallique . .	8
2.2	Représentation graphique de la résolution nominale et du volume de matière analysé par expérience pour différentes techniques de caractérisation 3D modernes . . . . .	9
2.3	Schématisation de la reconstruction 3D de données à la suite d'une expérimentation par coupes successives . . . . .	10
3.1	Schématisation simplifiée du processus d'analyses métallographiques 3D . .	14
3.2	Représentation globale du Métallographe 3D avec son environnement extérieur	28
3.3	Structure fonctionnelle des unités de logique et IHM de la PC . . . . .	31
4.1	Cadre relationnel de la logique de contrôle programmée et distribuée de l'automatisme du Métallographe 3D . . . . .	34
4.2	Représentation graphique des environnements du logiciel TwinCAT 3 . . .	35
4.3	Concept de l'environnement d'exécution des tâches de l'application de contrôle PLC . . . . .	36
4.4	Architecture d'une application TwinSAFE . . . . .	37
4.5	Présentation de l'arborescence du projet PLC . . . . .	39
4.6	Diagramme de classe UML du bloc fonctionnel <b>FB_Metallograph</b> . . . . .	41
4.7	Machine à états du Métallographe 3D mise en œuvre par le bloc-fonction <b>FB_StateMachine</b> . . . . .	42
4.8	Schéma conceptuel du mécanisme d'échange événementiel ADS entre l'application PLC et WPC (en anglais) . . . . .	45
4.9	Présentation générale de la structure de l'application <b>Windows Metallograph Cockpit</b> . . . . .	49
4.10	Schématisation du concept du cadre de messagerie du <b>Metallograph Cockpit</b> (en anglais) . . . . .	51
4.11	Composition de la classe principale <b>Metallograph</b> de l'interface de programmation applicative . . . . .	55
4.12	Schématisation de l'arborescence du répertoire de travail d'une session de métallographie nouvellement créée . . . . .	57
4.13	Présentation de la structure des paramètres métallographiques (1 de 2) . .	58
4.14	Présentation de la structure des paramètres métallographiques (2 de 2) . .	59
4.15	Présentation de la structure du graphe visuel de l'API . . . . .	60

4.16	Présentation générale de la logique de contrôle du système de manipulations robotisées (en anglais) . . . . .	63
4.17	Machine à états de la tâche principale <b>MAIN</b> . . . . .	66
4.18	Schématisation du système de coordonnées d'un bras robotisé FANUC . . . . .	70
5.1	Montage photo de dix images à la suite d'un test de répétabilité avec les filtres polarisants et la caméra numérique . . . . .	76
5.2	Exemple de deux images, capturées à la même position et recadrées au même endroit, avec des angles différents pour l'analyseur et un angle constant pour le polariseur . . . . .	77
5.3	Exemple d'une image d'un C4 en haute résolution 2448 x 2048 pixels . . . . .	77
5.4	Quatre résultats pour différentes expériences de prépolissage et polissage . . . . .	78
5.5	Pile d'images à la suite de coupes sectionnelles par polissage de 3 µm durant 30 secs . . . . .	80
5.6	Résultat de la dernière expérience d'analyses métallographiques avec le système final . . . . .	84
A.1	Concept du prototype expérimental d'analyses métallographiques 3D (Métallographe 3D) . . . . .	93
A.2	Prototype expérimental réel en début de projet . . . . .	94
A.3	Prototype expérimental réel en fin de projet . . . . .	94
A.4	Exemples d'échantillon de puce électronique dans un support cylindrique en époxy . . . . .	95
A.5	Concept du porte-échantillon (vue du dessous) . . . . .	95
A.6	Porte-échantillon réel avec un échantillon de 1.5 pouces de diamètre . . . . .	96
A.7	Concept du sous-système de préparation de surface . . . . .	97
A.8	Concept du sous-système de nettoyage . . . . .	97
A.9	Concept du sous-système de caractérisation (vue de côté) . . . . .	98
A.10	Concept de la plaque mobile avec positionnement isostatique . . . . .	99
A.11	Concept du système de microscopie motorisée . . . . .	99
A.12	Concept du microscope optique à lumière polarisante . . . . .	100
A.13	Plan rapproché de l'objectif et du palpeur numérique du microscope . . . . .	100
A.14	Vue d'ensemble de la famille de produits CX2000 avec CPU, unité d'alimentation et modules de base . . . . .	102
B.1	Document graphique GEMMA . . . . .	103
D.1	Légende des types de connexion des schémas synoptiques . . . . .	117
D.2	Schéma synoptique du système et des sous-systèmes (1 de 2) . . . . .	118
D.3	Schéma synoptique du système et des sous-systèmes (2 de 2) . . . . .	118
D.4	Schéma synoptique du sous-système d'alimentation électrique PSU . . . . .	119
D.5	Schéma synoptique du sous-système d'alimentation pneumatique CASU . . . . .	119
D.6	Schéma synoptique du sous-système d'alimentation hydraulique WSU . . . . .	120
D.7	Schéma synoptique du sous-système de protection PRO . . . . .	120
D.8	Schéma synoptique du sous-système de manipulation MAN (1 de 2) . . . . .	121
D.9	Schéma synoptique du sous-système de manipulation MAN (2 de 2) . . . . .	121

D.10 Schéma synoptique du sous-système de préparation de surface POL (1 de 3)	122
D.11 Schéma synoptique du sous-système de préparation de surface POL (2 de 3)	122
D.12 Schéma synoptique du sous-système de préparation de surface POL (3 de 3)	123
D.13 Schéma synoptique du sous-système de nettoyage CLE (1 de 2)	123
D.14 Schéma synoptique du sous-système de nettoyage CLE (2 de 2)	124
D.15 Schéma synoptique du sous-système de caractérisation de surface CAR (1 de 2)	124
D.16 Schéma synoptique du sous-système de caractérisation de surface CAR (2 de 2)	125
D.17 Schéma synoptique du sous-système de contrôle et de commande CTRL	125
E.1 Schématisation de la couche de transport ADS	128
E.2 Comparaison de différents types de données du logiciel TwinCAT avec divers langages de programmation populaires	129
F.1 Diagramme d'activité de la séquence de caractérisation de surface	131
F.2 Diagramme d'activité de la sous-séquence de métallographie en polarisation croisée	132
F.3 Diagramme d'activité de la séquence de prépolissage et polissage (1 de 2)	134
F.4 Diagramme d'activité de la séquence de prépolissage et polissage (2 de 2)	135
F.5 Diagramme d'activité de la séquence de nettoyage (1 de 2)	136
F.6 Diagramme d'activité de la séquence de nettoyage (2 de 2)	137
G.1 Aperçu général de la composition de l'interface graphique du <b>Metallograph Cockpit</b>	141
H.1 Cabinet électrique de puissance et sectionneur d'alimentation principale du Métallographe 3D	159
H.2 Unité principale d'alimentation et distribution en eau	160
H.3 Unité principale d'alimentation et distribution en air comprimé	160
H.4 Station à six boutons	161
H.5 Stations à trois boutons	161
H.6 Cabinet opérateur et terminal de programmation du contrôleur R-J3 de Fanuc	161
H.7 Différentes vues et indications du porte-échantillon	162
H.8 Porte-échantillon à la station de caractérisation pour l'ajustement de l'axe Y	162
H.9 Exemple d'un fichier de paramètres métallographiques	163
H.10 Effecteurs de liquide de la station de préparation de surface	164
H.11 Contenants de liquide de polissage de la station de préparation de surface	164



# LISTE DES TABLEAUX

3.1	Éléments du milieu extérieur identifiés pour la phase d'utilisation normale du Métallographe 3D . . . . .	16
3.2	Définitions des classes de flexibilité selon l'AFNOR . . . . .	19
3.3	Cahier des charges fonctionnel du Métallographe 3D . . . . .	20
3.4	Sommaire des interactions utilisateur-machine pour différents stades du processus ou cycle métallographique . . . . .	24
3.5	Liste des procédures de marche et d'arrêt retenues . . . . .	25
3.6	Fonctions de sécurité du système de Métallographie 3D . . . . .	26
3.7	Définition des sous-systèmes du système final . . . . .	27
3.8	Vue d'ensemble des constituants fonctionnels du Métallographe 3D . . . . .	29
4.1	Présentation des différents états logiques d'un groupe de sécurité TwinSAFE	37
4.2	Paramètres de configuration NC pour les axes moteurs du microscope motorisé	38
4.3	Description des principales méthodes invoquées cycliquement par le bloc-fonction système <b>FB_Metallograph</b> . . . . .	40
4.4	Conditions de transition pour la machine à états système . . . . .	42
4.5	Description des blocs-fonctions de service d'un module ADS . . . . .	44
4.6	Description des différentes entités du mécanisme de communication ADS du Métallographe 3D . . . . .	46
4.7	Spécifications des services WCF du cadre de messagerie . . . . .	50
4.8	Description des bibliothèques logicielles externes utilisées pour la manipulation de données dans <b>Metallograph Cockpit</b> . . . . .	52
4.9	Résumé des principales propriétés TIFF de base utilisées pour l'enregistrement d'images (en anglais) [51] . . . . .	53
4.10	Résumé des principales propriétés TIFF personnalisées utilisées pour l'enregistrement de métadonnées dans les images (en anglais) . . . . .	54
4.11	Description des objets de la classe <b>Metallograph</b> . . . . .	55
4.12	Présentation des modules ADS du <b>Metallograph Cockpit</b> . . . . .	56
4.13	Description des sous-interfaces d'une interface utilisateur de base . . . . .	60
4.14	Description des différentes classes de programme de l'application robot . . . . .	63
4.15	Description des programmes KAREL (.PC) de l'application robot . . . . .	63
4.16	Description des programmes TP (.TP) de l'application robot . . . . .	64
4.17	Conditions de transition de la machine à états de la tâche <b>MAIN</b> . . . . .	65
4.18	Présentation des différentes tables de données du protocole Modbus . . . . .	68
4.19	Correspondance des tables de données Modbus aux E/S du contrôleur FANUC	68
4.20	Fonctions réalisées par le serveur Modbus de l'unité logique robot . . . . .	68
4.21	Référentiels de travail employés par les programmes de manipulation robotisée	70
4.22	Référentiels outil employés par les programmes de manipulation robotisée .	70
5.1	Paramètres utilisés pour l'expérience finale d'analyses métallographiques .	83
5.2	Mesures des avances de l'expérimentation finale . . . . .	84

5.3	Estimation du temps de la phase de coupe sectionnelle après optimisation .	86
5.4	Estimation du temps de la phase de caractérisation pour 36 analyses métallographiques différentes après optimisation . . . . .	87
C.1	Liste des composants fonctionnels du Métallographe 3D (1 de 2) . . . . .	105
C.2	Liste des composants fonctionnels du Métallographe 3D (2 de 2) . . . . .	108
D.1	Liste des effecteurs et unités de stockage du système final . . . . .	113
D.2	Liste des Interfaces Homme-Machine (IHM) . . . . .	114
D.3	Liste des connexions d'énergies opératives . . . . .	115
D.4	Définition des signaux de contrôle et de communication . . . . .	116
D.5	Caractéristique des unités de contrôle . . . . .	117

---



# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

Depuis quelques décennies, l'émergence de lois environnementales à l'échelle mondiale, spécifiquement la Directive européenne RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*), cherche à éliminer l'usage du plomb dans les équipements et les composants électroniques à cause de sa nature toxique [1]. Notamment, dans l'industrie de la fabrication de produits électroniques, ces lois contraignent les manufacturiers à substituer les conventionnelles brasures d'étain-plomb (Sn-Pb) par des alliages sans-plomb. Pour l'heure, l'alliage quasi eutectique étain-argent-cuivre (SAC) représente l'une des meilleures alternatives de remplacement [2], [3]. Le projet présenté dans ce mémoire s'intéresse particulièrement aux caractéristiques physiques de la microstructure des brasures produites durant un processus d'assemblage par puce retournée (*flip-chip*). Pour mettre en contexte, la figure 1.1 illustre les principales étapes de cette technique. Brièvement, l'assemblage par puce retournée sert à créer les connexions électriques et mécaniques entre un semi-conducteur et son substrat. Ces interconnexions sont des billes de petits diamètres ( $< 100 \mu\text{m}$ ), nommées C4 (*Controlled Collapse Chip Connection*). La figure 1.2 montre une coupe transversale d'un composant microélectronique une fois assemblé avec des C4.

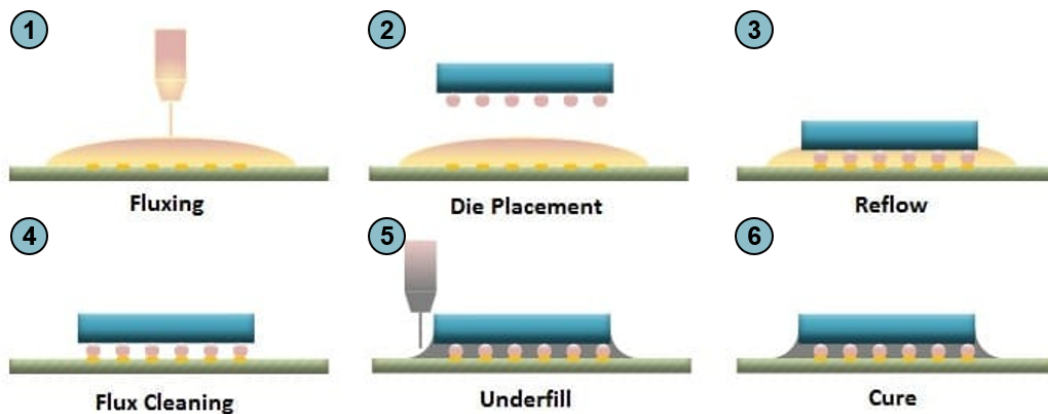


Figure 1.1 Schématisation des différentes étapes du procédé d'assemblage par puce retournée (*flip-chip*) [4]

Les procédés d'encapsulation avec des alliages SAC sont complexes à réaliser puisque la performance des joints de soudure sans-plomb (force mécanique, résistance à la fatigue,

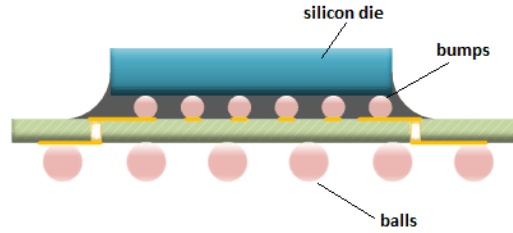


Figure 1.2 Coupe transversale d'un semi-conducteur connecté à son substrat par C4 (*bumps*) [4]

comportement de fluage, réponse élastique, formation des grains, etc.) est différente et plus aléatoire que celle à base de plomb. Par exemple, le point de fusion d'un métal SAC est, dépendamment de sa composition chimique, environ 30° à 40° supérieur du point de fusion théorique d'un alliage eutectique étain-plomb [5]. Par conséquent, les techniques d'assemblage sans-plomb nécessitent des températures maximales de refusion beaucoup plus grandes ainsi que des taux de cuisson et de refroidissement plus importants. De plus, plusieurs études mentionnent que les différences entre les coefficients d'expansion thermique de la puce de silicium (*silicon die*), des interconnexions et du substrat sont relativement élevées [1]-[3], [5]-[11]. Ces écarts provoquent des forces de cisaillement et de traction au niveau des C4 lorsque le composant électronique est sujet à des changements de température importants lors de l'assemblage ou de son fonctionnement [3], [8]-[10].

Pour continuer, des travaux de recherche ont établi que les propriétés physiques des joints de soudures SAC, principalement de petites tailles (diamètre < 150  $\mu\text{m}$ ) et avec une forte concentration d'étain, sont fortement influencées par la morphologie et l'orientation des grains formant le C4, compte tenu la nature anisotrope de ce métal [7], [9], [10], [12]. Plusieurs études ont également expérimenté l'effet de différentes caractéristiques de la microstructure des grains sur le comportement mécanique des interconnexions telles que la quantité [13], [14], la distribution [15]-[17], la composition chimique [1], [8], [17], [18], l'orientation et la taille [6], [7], [12]-[14], [18]. La majorité de ces études concluent que certaines formations de ces grains sont plus propices que d'autres d'engendrer des défaillances prématurées durant les phases d'assemblage ou durant le cycle de vie du composant. Des effets comme le gauchissement (*warpage*), le décollement de la puce du laminé (*delamination*) ou même la fissuration des interconnexions, notamment aux extrémités des puces, sont observés. La figure 1.3 illustre quelques exemples de défauts rencontrés. Ces différents modes de défaillance sont difficiles à prévenir vu le caractère aléatoire de la formation de ces grains.

Actuellement, les manufacturiers ont des soucis en ce qui concerne l'intégrité et la fiabilité des joints de soudures sans-plomb [5], [8], [11] pendant et après un assemblage par puce retournée. D'autres paramètres contribuent au facteur de risques de défaillance comme la dimension de la puce, la structure et dimension du laminé organique, ainsi que la quantité, la densité et la grosseur des pas des C4. Ces éléments ajoutent des contraintes et stress aux extrémités des interconnexions. De plus, les manufacturiers en microélectronique doivent s'accommoder à la constante demande du marché concernant l'amélioration de la performance, la miniaturisation et l'augmentation de la densité des interconnexions, ce qui crée un réel enjeu pour ces fabricants dans un futur proche.

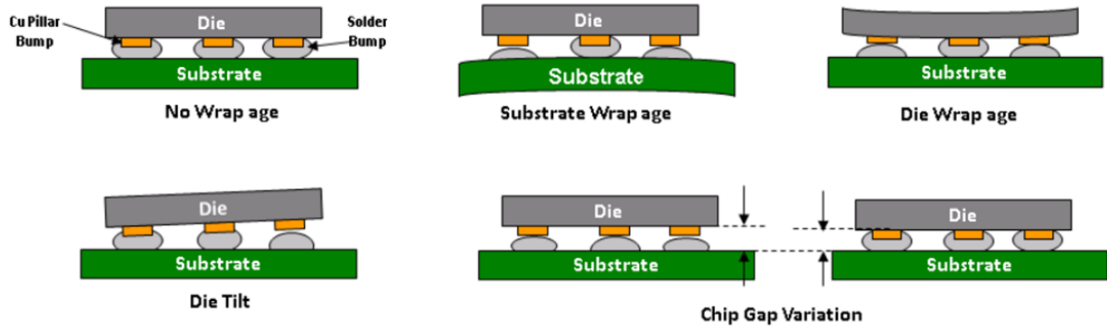


Figure 1.3 Illustrations de quelques modes de défaillances observables prématurément lors d'un assemblage par puce retournée [19]

Dans le but de mieux comprendre l'origine des différents mécanismes de défaillance prématurée, il faut être en mesure de corréler l'effet des grains sur les propriétés mécaniques des joints de soudure sans-plomb. À ce jour, plusieurs techniques d'analyse cristallographique ou métallographique existent afin de caractériser la microstructure d'un alliage ou d'un simple métal. Cependant, une grande majorité de ces techniques se limitent à l'étude d'un seul plan d'un échantillon ou elles sont complexes et longues à réaliser. La recherche présentée dans ce mémoire cherche à mettre en service un équipement expérimental capable d'acquérir rapidement et automatiquement de l'information tridimensionnelle sur la microstructure de C4 d'une puce microélectronique. Le concept de ce prototype se base sur une technique de coupes en série combinée à des analyses métallographiques. Une analyse métallographique consiste en la capture d'images par microscopie à lumière polarisée croisée et métrologie de surface pour déterminer l'avance des coupes. Ce processus produit plusieurs séries d'images pour chaque plan de coupe (section), en fonction des paramètres de caractérisation spécifiés. Le concept original de cet équipement, baptisé Métallographe

3D<sup>1</sup>, est présenté à l'annexe A. Quoique le projet initiateur [20] définit très bien la nature et les concepts de ce prototype, ce dernier est incomplet et il faut valider quelques critères de performance ainsi que le processus à automatiser. Ceci étant dit, le projet de recherche présenté dans ce mémoire a complété les parties manquantes de cet équipement en plus de répondre à la question de recherche suivante :

*Est-il possible d'automatiser un cycle d'analyses métallographiques 3D du prototype jusqu'à un niveau fonctionnel pour qu'un utilisateur soit capable d'extraire, rapidement et en toute sécurité, des caractéristiques 3D de la microstructure des grains d'un C4 ?*

Pour y répondre, l'objectif principal du projet de recherche est de concevoir le système de contrôle (l'automatisme) du prototype métallographique 3D afin de réaliser des cycles d'analyses métallographiques automatiquement. Concrètement, le projet implique la réalisation des tâches suivantes :

- Établir le cahier des charges fonctionnel (CdCF) du système de contrôle de l'équipement ;
- Identifier et intégrer tous les composants opératifs du système ;
- Déterminer les entrées et sorties ainsi que les points d'opération du système ;
- Déterminer au minimum les paramètres d'entrée du processus ;
- Déterminer le format et type de données en sortie du processus ;
- Concevoir l'architecture et la logique de contrôle du système ;
- Réaliser les diverses séquences du processus ;
- Valider et évaluer la performance des fonctions de service et du processus global.

Sommairement, la réalisation du projet de recherche a mené à :

- La réalisation d'un système de contrôle distribué et à temps réel basé sur une architecture unique et modulaire spécialement adaptée à l'équipement ;
- La mise en service d'un équipement expérimental (Métallographe 3D) capable d'exécuter des séquences, cycles d'analyse métallographiques 3D et diverses commandes manuellement ;
- L'identification et caractérisation des points de contrôle et paramètres critiques du procédé ;
- La production des premières données expérimentales de l'équipement ;

---

1. La précédente recherche fait mention de « tomographe » qui techniquement porte à confusion puisque la tomographie repose sur des techniques de radiographie ou d'imagerie non destructives contrairement à celle employée dans cette recherche. Pour cette raison, ce mémoire emploie les termes « métallographe » ou « métallographie » à la place.

---

- La proposition d’une procédure personnalisée afin de pratiquer une séance de métallographie 3D pour de futurs utilisateurs.

À la suite de la présente introduction, le chapitre 2 de ce mémoire examine les concepts fondamentaux et les techniques métallographiques 3D modernes de l’état de l’art par rapport à la technique employée. Pour répondre aux objectifs énoncés, une méthodologie de conception de système automatisé a servi comme prémisse pour analyser les concepts initiaux du processus et prototype métallographique, établir les besoins et concevoir l’automatisme. Cette méthodologie est une inspiration et une adaptation de quelques concepts provenant de certains ouvrages ainsi que de normes et standards :

1. Les outils graphiques du livre « Management de projet technique : Méthodes et outils » [21] ;
2. La méthode APTE (application aux techniques d’entreprise) pour l’expression du besoin et l’expression fonctionnelle d’un produit ou projet technique [21] ;
3. La caractérisation des fonctions selon l’AFNOR (NF EN 16271) ;
4. La procédure générique de conception d’un système automatisé de l’ouvrage « *Mechatronic Systems and Process Automation : Model-Driven Approach and Practical Design Guidelines* » [22] ;
5. L’approche de conception pilotée par le domaine pour la réalisation des programmes logiques distribués [23].

Enfin, la figure 1.4 présente conceptuellement la méthodologie qui a servi à concevoir l’automatisme du Métallographe 3D. À cette figure, chaque flèche (chevron) représente une étape alors qu’un rectangle de la même couleur spécifie le résultat de cette étape. Les paragraphes suivants donnent la description de chacune de ces étapes alors que les prochains chapitres couvriront dans l’ordre logique ces différentes parties.

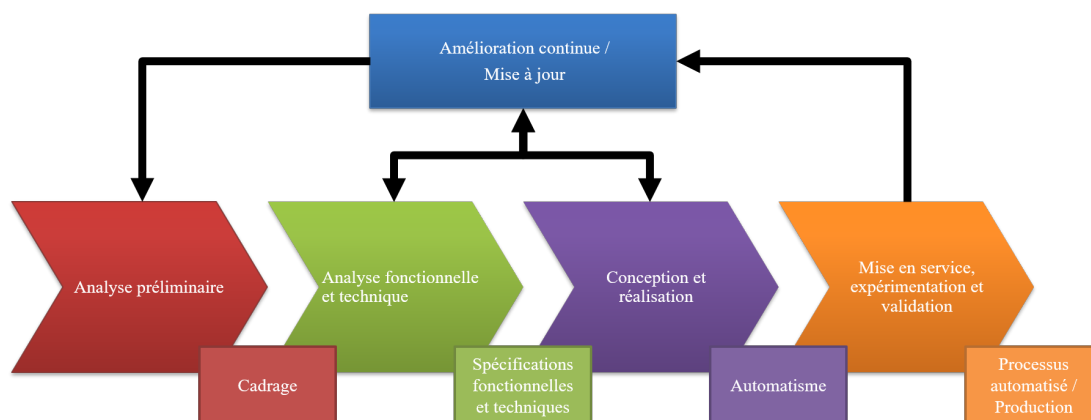


Figure 1.4 Méthode généralisée et simplifiée pour la conception d’un système automatisé

La méthodologie de conception comprend quatre étapes. Ces étapes s'exécutent de manière itérative puisque le processus à automatiser consiste en une méthode expérimentale où plusieurs paramètres et variables sont encore inconnus, notamment en début de projet. Il est donc justifiable d'itérer sur les différentes étapes au cours du développement.

### **Analyse préliminaire**

Cette étape exprime de manière concise le besoin du projet de recherche. Elle met en évidence les délimitations, les ressources disponibles et les spécifications d'ordre général du projet. De plus, elle redéfinit globalement le processus à automatiser, c'est-à-dire les phases et les cycles d'analyses métallographiques. Cette analyse mène au cadrage du projet et est présentée au début du chapitre 3.

### **Analyse fonctionnelle et technique**

Cette étape cherche d'abord à analyser le système automatisé d'un point de vue externe afin d'identifier les fonctions de service et de les caractériser. Cette première analyse résulte à la rédaction du CdCF du système automatisé. Ensuite, une analyse d'un point de vue interne établit les lignes directrices de conduite de l'application contrôle et effectue par la même occasion une revue des choix technologiques employés pour compléter la partie opérative (PO) et la partie commande (PC) du prototype initial. Le chapitre 3 présente ces deux analyses.

### **Conception et réalisation**

Cette étape regroupe tous les travaux de conception préliminaire et détaillée de l'automatisme de l'équipement et du processus métallographique 3D. Le chapitre 4 présente le système automatisé final et décrit concrètement les trois sous-systèmes logiques formant le cœur de l'automatisme. Ce chapitre présente également les concepts techniques spécialement choisis ou développés pour concrétiser ce système logique.

### **Mise en service, expérimentation et validation**

Cette étape regroupe les expérimentations, les tests et validations d'intégration, les fonctions de service du système, l'utilisation de l'équipement dans son ensemble et les résultats préliminaires. À ce sujet, le chapitre 5 discute de la performance des principales séquences automatisées d'un cycle d'analyses métallographiques, décrit quelques expériences pertinentes ainsi que les résultats produits au cours du développement du système automatisé.

Finalement, le chapitre 6 donne une brève conclusion suivie d'une rétrospective sur les objectifs du projet de recherche. À la toute fin, ce document offre plusieurs annexes ainsi que la liste de références dans le but de soutenir et compléter les propos énoncés dans ce mémoire.

---

# CHAPITRE 2

## MÉTALLOGRAPHIE 3D

Dans le domaine de la science des matériaux, l'étude de la microstructure d'un métal, en l'observant au moyen d'un microscope optique ou électronique, se nomme la métallographie. Ce type d'analyse aide notamment les scientifiques à identifier la forme, la distribution, la quantité et les constituants d'un corps métallique. L'ensemble de ces microstructures s'étale sur une échelle spatiale allant de plusieurs millimètres à quelques nanomètres. L'analyse métallographique incarne l'étape critique afin d'évaluer si le procédé de transformation d'un alliage répond aux critères de fiabilité ou de robustesse du produit.

À ce jour, il existe une abondance de méthodes pour révéler la microstructure d'un échantillon métallique selon les caractéristiques d'intérêt. À ce propos, la communauté scientifique s'intéresse de plus en plus à la collecte d'informations microstructurales en trois dimensions dans le but d'obtenir une définition plus authentique et précise de la composition d'un matériau. En fait, des données tridimensionnelles offrent la possibilité de quantifier d'importantes caractéristiques physiques (p. ex. la géométrie, la morphologie, la topologie, la distribution, etc.) que les méthodes par stéréologie classiques ne permettent pas d'estimer ou de calculer [24], [25].

Contrairement aux traditionnelles techniques métallographiques basées sur de simples plans, la collecte de données 3D demande généralement plus de préparation et d'efforts. Cependant, avec l'avancement rapide de la puissance de calcul des ordinateurs, le développement de techniques d'imagerie sophistiquées, les logiciels d'analyse 3D et l'usage de système automatisé, la caractérisation tridimensionnelle a énormément progressé. Depuis les deux dernières décennies, un nombre remarquable d'articles et de journaux a répertorié des méthodes expérimentales pour caractériser, quantifier et visualiser la microstructure de métaux en trois dimensions [26].

Actuellement, il existe essentiellement deux approches pour analyser la microstructure tridimensionnelle d'un corps métallique ou d'un matériau opaque comme les C4 [27], [28] :

- Méthode basée sur des coupes en série (*serial sectioning*);
- Méthode basée sur la tomographie à rayons X (*X-Ray tomography*).

La figure 2.1 illustre conceptuellement ces deux techniques. Pour ajouter, la figure 2.2 montre une représentation graphique du groupe de Uchic *et coll.* [27] résumant bien l'en-

semble des méthodes et instruments modernes ayant la capacité de collecter des données microstructurales 3D d'alliages métalliques et composites.

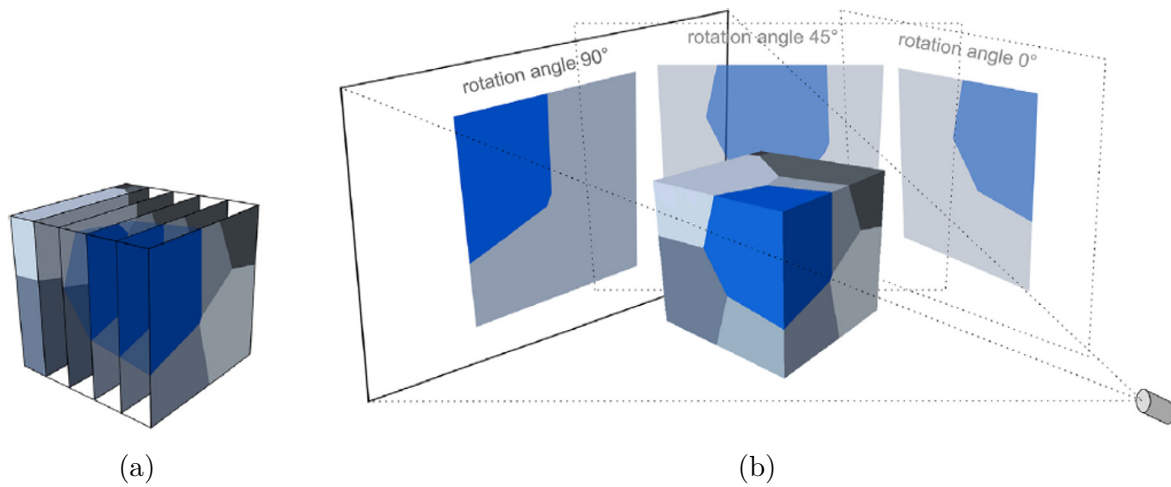


Figure 2.1 Deux approches pour la caractérisation 3D d'un échantillon métallique : (a) coupes en série; (b) imagerie par projection ou rayonnement [28]

Ces différentes techniques couvrent la totalité de l'échelle spatiale des caractéristiques microstructurales d'un alliage, c'est-à-dire l'identification d'un simple atome [29]-[31] jusqu'à l'inspection de détails macroscopiques (quelques millimètres) [32]. Voici, en guise d'exemples, quelques méthodes métallographiques modernes permettant de générer des données volumétriques sur la microstructure d'un spécimen métallique :

- Tomographie par sondage atomique [29], [30] ;
- Ablation au laser ultra rapide et microscopie à balayage électronique (SEM) [33] ;
- Coupe par faisceau d'ions focalisé (FIB) et SEM [34]-[36] ;
- Polissage et microscopie optique [32], [37] ;
- Tomographie à rayons X [38]-[40] ;
- Tomographie avec microscope électronique en transmission (TEM) [41]-[43].



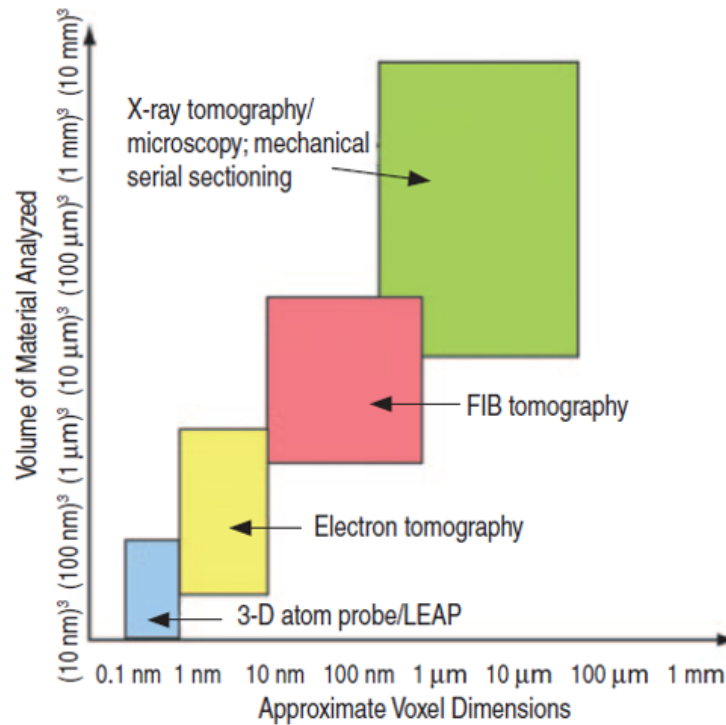


Figure 2.2 Représentation graphique de la résolution nominale et du volume de matière analysé par expérience pour différentes techniques de caractérisation 3D modernes [27]

## 2.1 Approche destructive et non destructive

La principale distinction entre une expérimentation par coupes en série et par tomographie à rayons X est que la première méthode est destructive alors que la deuxième ne l'est pas. Avec la première approche, l'échantillon analysé est physiquement sectionné à chaque itération menant jusqu'à la destruction complète du spécimen.

Les avantages de la tomographie à rayons X sont la capacité de garder l'échantillon intact et la possibilité de réaliser des études qui sont dépendantes du temps, comme analyser l'évolution de la microstructure avant et après un test expérimental de stress thermique ou mécanique [38], [40]. À ce jour, il existe une variété de techniques de tomographie basée sur le rayonnement aux rayons X [43]. Le principal désavantage de ces techniques est la nécessité d'utiliser des rayons X de grande intensité pour caractériser des matériaux opaques tels que des métaux. Par contre, il faut utiliser des sources de rayonnement synchrotron de troisième génération afin d'obtenir un rapport signal sur bruit suffisamment élevé pour produire des données 3D avec une résolution décente [40], [44]. Un autre désavantage significatif de cette approche est que ce type de rayonnement restreint considérablement son usage à des laboratoires spécialisés et conçus pour ce type d'expérimentation en raison des effets nocifs des rayonnements sur le corps humain.

L'approche par coupes en série compte parmi l'une des techniques les plus populaires pour la caractérisation tridimensionnelle de microstructure de métaux pour une échelle macro-microscopique [44]. Cette technique de caractérisation 3D comprend deux étapes qui sont répétées jusqu'à la fin de l'expérience. La première étape consiste à préparer la surface de l'échantillon dans le but d'obtenir une surface relativement plane et propre, en pratiquant une méthode de coupe quelconque (p. ex. sciage, polissage, ablation, gravure, pulvérisation ionique, etc.) où une quantité constante de matériel est retirée à chaque coupe (section). La deuxième étape consiste à recueillir des mesures sur les caractéristiques microstructurales (2D) de chaque plan de coupe (p. ex. image optique, orientation cristalline, composition chimique, etc.). Ces deux étapes conceptualisent la modélisation directe. Une fois la série de données 2D amassée, la construction d'une matrice 3D est faite à partir d'algorithmes et de programmes spécialisés. Cette étape correspond à la modélisation inverse. Conjointement, la modélisation directe et inverse forme le processus de reconstruction 3D d'une expérience par coupes en séries. La figure 2.3 illustre simplement ces concepts.

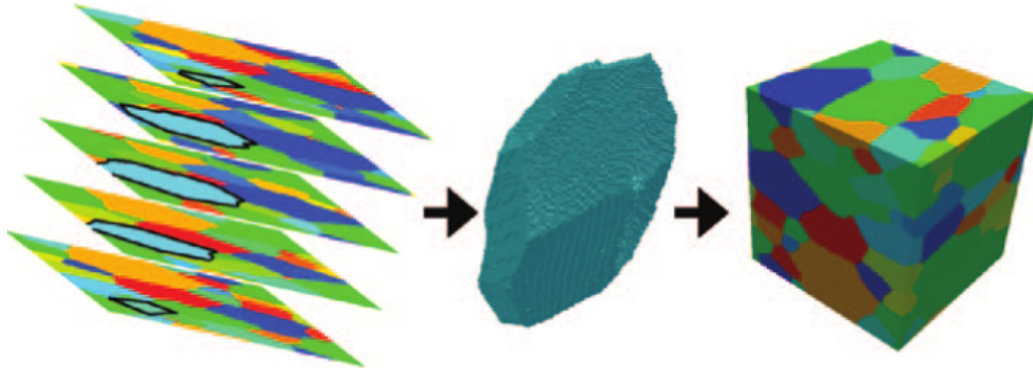


Figure 2.3 Schématisation de la reconstruction 3D de données à la suite d'une expérimentation par coupes en série [27]

Comme toute méthode, l'approche par coupes en série a ses avantages et ses inconvénients. D'abord, cette technique est plus abordable que la tomographie à rayons X puisque les instruments pour l'enlèvement de matière et pour la caractérisation 2D sont moins coûteux et beaucoup plus accessibles pour de petits et grands laboratoires. Un autre point fort de cette technique est la facilité à laquelle il est possible d'intégrer différents appareils de caractérisation pour la prise de mesure entre chaque section [44]. Par exemple, des instruments d'analyse métallographique (microscopie optique, microscopie électronique à balayage (SEM) ou à transmission (TEM)), de surface (diffraction d'électrons rétrodiffusés (EBSD)), de caractérisation chimique par spectroscopie ou même d'analyse topographique (microscopie à force atomique (AFM), profilométrie optique, etc.) permettent de mesurer diverses caractéristiques physiques à chaque plan de coupe [27]-[30], [32], [35]-[37], [44].

Les inconvénients de cette méthode sont la durée d'une expérience plus longue et la destruction complète de l'échantillon à la fin de l'expérience. Pour ajouter, la quantité de données recueillies au cours d'une telle pratique est colossale si plusieurs équipements de caractérisation combinés à différents ensembles de paramètres entre chaque coupe. Cette quantité de données est alors autant profitable que laborieuse à traiter dépendamment de la justesse et de la pertinence des mesures.

## 2.2 Tendence à l'automatisation et à la caractérisation multimodale

La simplicité et la nature répétitive de la technique de coupes en série sont idéales pour le développement de systèmes automatisés en combinant des appareils de coupe et de caractérisation [44]. Effectivement, l'automatisation d'équipements de laboratoire procure un bon nombre d'avantages. D'abord, en automatisant la technique métallographique, il est possible d'ajouter des systèmes d'inspection et de métrologie à travers les cycles de sectionnement. De ce fait, lorsque le système est contrôlé en boucle fermée, il est beaucoup plus facile de maintenir et superviser certains paramètres d'expérience (p. ex. intensité de lumière, épaisseur des coupes, positionnement, etc.) déterminants pour pratiquer une modélisation inverse fidèle à la réalité. De plus, l'automatisation de la méthode réduit les problèmes associés aux manipulations qui pourraient influencer la précision et la qualité des mesures lors d'une expérience [27].

Un autre aspect avantageux avec un tel système est le gain significatif en temps sur la récolte de masse de données par opposition à cette méthode pratiquée manuellement qui est généralement une procédure longue et minutieuse. Le simple fait d'automatiser le déplacement de l'échantillon entre les différents instruments ou stations de caractérisation accélère grandement le temps des manipulations. Dans certains cas, il est même possible de paralléliser la technique et réaliser l'expérience avec plusieurs échantillons à la fois [27].

En plus de la tendance à l'automatisation, il y a également une prédisposition à la caractérisation multimodale, c'est-à-dire à l'utilisation de différents appareils de mesure pour obtenir une diversité d'information à chaque section inspectée. Par exemple, le groupe de Uchic *et coll.* [32] a développé un système capable d'effectuer des mesures par microscopie électronique à balayage (SEM), par diffraction d'électrons rétrodiffusés (EBSD) et par spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS). Avec ces différentes mesures, ils réussissent à reconstruire en trois dimensions une variété de microstructures de spécimens métalliques.

À l'heure actuelle, il existe très peu d'instruments qui utilisent une méthode de coupes en série et de caractérisation multimodale entièrement automatisée pour obtenir des données

---

volumétriques sur la microstructure de métaux [44], [45]. Par exemple, la liste suivante énumère les systèmes trouvés dans la littérature, qui sont partiellement ou entièrement automatisés pour la caractérisation 3D d'alliages métalliques :

- Système FIB-SEM [34] ;
- RoboMet [32] ;
- Genus\_3D [46] ;
- Métallographe 3D (ce projet-ci) [20].

## 2.3 Métallographe 3D

Parmi tous les systèmes de caractérisation 3D trouvés dans la littérature, il n'y a aucun d'entre eux qui cherchent à caractériser la microstructure 3D des grains de C4 sans-plomb à l'aide de coupes en série et microscopie en lumière polarisée. En pratique, la caractérisation 3D des grains de soudures sans-plomb se base uniquement sur des techniques cristallographiques EBSD ou par imagerie à rayons X. Or, ces techniques sont très longues et complexes pour produire rapidement une grande quantité de données. Par contre, la technique conceptualisée lors de la précédente recherche [20] semble l'approche la plus prometteuse pour générer des données tridimensionnelles des grains d'alliage SAC.

La microscopie en lumière polarisée est bien connue par la communauté scientifique comme une technique d'observation de rehaussement de contraste pour des matériaux ayant des caractéristiques biréfringentes (double réfraction) [47], [48]. Pour un matériau biréfringent (p. ex. étain, calcite, etc.), l'indice de réfraction n'est pas unique, c'est-à-dire que celui-ci dépend de la direction de polarisation de l'onde lumineuse. Avec ce type de caractérisation, il est intéressant d'exploiter l'anisotropie (orientation) des grains de l'étain pour mettre en évidence les différents domaines cristallographiques des interconnexions sans-plomb [6]. En automatisant la technique métallographique 3D [20], il serait possible à un scientifique de produire et d'étudier la microstructure 3D des grains de C4 avec l'objectif de minimiser l'effort et le temps de production de données comparativement aux techniques actuelles.

---

# CHAPITRE 3

## ÉTUDE CONCEPTUELLE

Étant donné que le projet présenté dans ce mémoire est le prolongement d'une précédente recherche, il est sous-entendu que le projet doit employer et s'adapter à certains choix techniques et technologiques. Tous ces choix ont mené à l'élaboration de la méthode expérimentale d'analyses métallographiques 3D et au design de l'équipement, alias Métallographe 3D. L'annexe A présente globalement le concept et les parties importantes de cet équipement. Pour de plus amples spécifications concernant l'origine et les choix de conception initiaux de cet outil, il est laissé à la discrétion du lecteur de consulter le mémoire de recherche de son inventeur [20].

### 3.1 Processus métallographique 3D

Avec l'objectif global du système bien défini, il est maintenant pertinent d'examiner le processus d'analyses métallographiques 3D proposé. Objectivement, la recherche précédente [20] a très bien défini ce processus et a du même coup retenu plusieurs concepts pour le matérialiser. La figure 3.1 illustre justement l'idée derrière ce processus et révèle les étapes primaires de cette méthode.

Le processus débute par un utilisateur qui fournit à la machine un échantillon installé dans un porte-échantillon ainsi qu'un ensemble de paramètres. Les paramètres d'entrée du système sont dénommés *paramètres métallographiques*. Une fois que les paramètres sont transmis et que le système est fonctionnel, l'utilisateur peut alors procéder à l'exécution d'un ou plusieurs cycles d'opération. Essentiellement, ce cycle se compose de trois séquences : 1) une préparation de surface (sectionnement) ; 2) un nettoyage ; 3) une caractérisation 2D d'une région spécifique de l'échantillon. Un cycle complet de ces séquences équivaut à un cycle d'analyses métallographiques, c'est-à-dire la caractérisation d'une coupe transversale (*cross section*) par microscopie optique à lumière polarisante et mesure de surface. Un cycle génère des données à deux dimensions et plusieurs analyses sont possibles par région de chaque plan.

Finalement, une fois que le nombre de cycles spécifié est atteint, l'utilisateur doit extraire les données produites par le système. Une fois ces données prélevées, elles sont utilisées pour un post-traitement et mènent éventuellement à la construction d'un modèle 3D des parties de l'échantillon caractérisées. Les données produites et les paramètres métallographiques

utilisés pour l'expérience se nomment les *données métallographiques*. Bref, toutes ces étapes conceptualisent une séance d'analyses métallographiques 3D, c'est-à-dire le processus à automatiser. Il est à noter que la portion de post-traitement des données n'est pas abordée dans ce mémoire étant donné que le projet n'a pas pu se rendre jusqu'à cette étape.

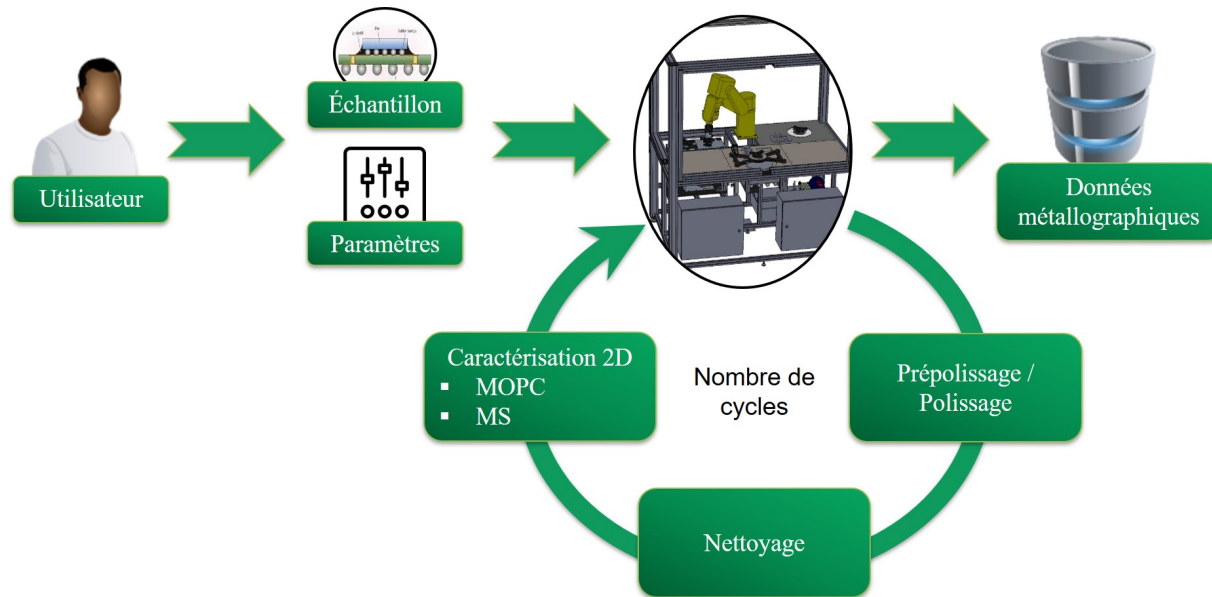


Figure 3.1 Schématisation simplifiée du processus d'analyses métallographiques 3D (MOPC : Microscopie optique en polarisation croisée; MS : Métrologie de surface)

## 3.2 Cadre du projet

Ce projet de recherche a réalisé ses travaux au Centre de Collaboration MiQro Innovation (C2MI) situé à Bromont. Brièvement, le C2MI est « un centre international de collaboration et d'innovation dans le secteur des MEMS et de l'encapsulation » [49]. Cette organisation est issue d'un partenariat original entre l'Université de Sherbrooke, Teledyne DALSA, et IBM Canada Itée. D'ailleurs, c'est dans le cadre de la Chaire de recherche CRSNG-IBM Canada, une étroite collaboration entre l'Université de Sherbrooke, le C2MI et IBM, que le projet a vu le jour. Au tout début de ce projet, IBM Bromont et l'Université de Sherbrooke ont conclu un accord. Enfin, l'assemblage initial et final du Métallographe 3D est localisé dans le laboratoire de Développement de nouveaux équipements du C2MI où les aménagements ont fourni l'alimentation, les outils et le matériel nécessaires pour le montage, le développement et la mise en marche de l'équipement.

### 3.3 Analyse fonctionnelle du besoin

L'analyse fonctionnelle du besoin ou l'analyse fonctionnelle externe établit la relation du produit (c.-à-d. le Métallographe 3D) en lien avec son contexte d'utilisation extérieur. Elle est une démarche qui consiste à rechercher et à caractériser les fonctions de service du besoin. Dans le cadre du projet, une fonction de service est définie, telle la norme AFNOR (NF EN 16271), comme « une action du produit ou de l'un de ces constituants exprimée exclusivement en termes de finalité et abstraite de tous moyens ou toutes solutions ». Lorsque le recensement est complété, les fonctions de service sont clairement exprimées et caractérisées dans le cahier des charges fonctionnel (CdCF). En somme, l'accomplissement de l'analyse fonctionnelle externe a suivi la procédure générale suivante :

1. Identification des phases de vie du produit ;
2. Pour chaque phase de vie (au minimum les principales) :
  - 2.1. Identification et caractérisation des éléments du milieu extérieur (EME) ;
  - 2.2. Identification des Fonctions de Service (FS) ;
  - 2.3. Caractérisation des FS ;
3. Rédaction du CdCF.

#### 3.3.1 Éléments du milieu extérieur (EME)

Pour identifier les fonctions de service d'un produit, il faut bien décrire son environnement (appelé « milieu extérieur »). En principe, il faut faire un recensement très rigoureux de tous les EME pour chacune des phases de vie identifiées lors de la précédente étape. Un EME se caractérise objectivement, sinon il n'est pas conforme à la définition d'un EME. Ceci étant dit, pour alléger le contenu de ce rapport, le tableau [3.1](#) présente seulement les principaux EME identifiés pour la phase d'utilisation normale.

---

Tableau 3.1 Éléments du milieu extérieur identifiés pour la phase d'utilisation normale du Métallographe 3D

N°	Élément du milieu extérieur	Description	Caractéristiques
1	Utilisateur	Tout usager qui interagit avec le système.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Expérience variée (p. ex. étudiant, professeur, développeur, personnel de maintenance, etc.)</li> <li>– Force physique variée</li> <li>– Tailles variables</li> </ul>
2	Sources d'alimentation	Toutes les sources d'énergie continues et nécessaires au système.	Spécifications minimales : <ul style="list-style-type: none"> <li>– Énergie électrique : 208V AC 3 phases, 30A</li> <li>– Air comprimé : 80-100 psi</li> <li>– Eau domestique : température ambiante ou froide ; Débit : 15-30 L/min</li> </ul>
3	Échantillon	Une puce électronique de petite taille avec des interconnexions sans-plomb (C4) moulée dans un cylindre en résine d'époxy (voir des exemples à l'annexe A.2).	Spécifications : <ul style="list-style-type: none"> <li>– Géométrie : cylindrique</li> <li>– Diamètres : <math>\varnothing 1.00''</math>, <math>\varnothing 1.25''</math>, <math>\varnothing 1.50''</math></li> <li>– Épaisseur : min. 10 mm, max. 40 mm</li> <li>– Matériel : résine époxy</li> </ul>
4	Matières d'œuvre	Toute la matière physique nécessaire au système sur laquelle un travail ou une transformation est effectué (excluant les sources d'alimentation et l'échantillon). Cela comprend essentiellement la matière d'œuvre pour les séquences de polissage et nettoyage.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Papier prépolissage : #600, #800, #1000, #1200, etc.</li> <li>– Solution abrasive à particules de diamant : <i>DP-Suspension</i> de 0.25 <math>\mu\text{m}</math> et 3.0 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>– Draps de polissage pour <i>DP-Suspension</i> (0.25 <math>\mu\text{m}</math>, 3.0 <math>\mu\text{m}</math>)</li> <li>– Diamètre draps et papiers : <math>\varnothing 10''</math></li> <li>– Solution lubrifiante : <i>DP-Lubricant Red</i></li> <li>– Solution nettoyante : mélange d'eau et de savon biologique pour microcontaminants</li> </ul>
5	Déchets / Résidus	Toute la matière physique transformée et non utile produite par le système.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Résidus de polissage</li> <li>– Mélange d'eau et de liquides</li> <li>– Draps et tapis usés</li> <li>– Échantillon après analyse</li> </ul>

⋮



⋮

N°	Élément du milieu extérieur	Description	Caractéristiques
6	Données métallographiques	Toute la matière d'œuvre transformée avec une valeur ajoutée produite par le système, principalement les données métallographiques. Le type et format de données sont définis au chapitre 4.2.3.	Exemples de données : <ul style="list-style-type: none"> <li>– Séries d'images 2D : 5 Mpx, 2448x2048 pixels ; rés. couleur 12-bits</li> <li>– Mesures du palpeur</li> <li>– Coordonnées spatiales des mesures</li> <li>– Horodatages (<i>timestamp</i>)</li> <li>– Paramètres métallographiques</li> </ul>
7	Commandes / Informations	Toutes les consignes reçues et informations transmises en périphérie du système.	Exemples de commandes : <ul style="list-style-type: none"> <li>– Boutons d'arrêt d'urgence</li> <li>– Sélecteur de mode d'opération</li> <li>– Commandes de déplacement d'axes moteurs</li> <li>– Capture d'images</li> </ul> Exemples d'informations : <ul style="list-style-type: none"> <li>– État de l'équipement, sous-systèmes, etc.</li> <li>– Statut des opérations</li> <li>– Indication de la PO sous-tension</li> </ul>
8	Paramètres d'opération	Tous les paramètres transférés et réglés depuis l'extérieur qui influencent la conduite du système.	Exemples de paramètres : <ul style="list-style-type: none"> <li>– Paramètres de séquence : Acquisition, polissage, nettoyage, manipulation, etc.</li> <li>– Paramètres machines : Pressions, débits, positions, tensions, etc.</li> </ul>
9	Phénomènes perturbateurs	Tous les phénomènes physiques qui ont le potentiel d'influencer la qualité et la performance du système.	Exemples : <ul style="list-style-type: none"> <li>– Bruitage des mesures</li> <li>– Vibrations et déplacements</li> <li>– Variations de température et d'humidité</li> <li>– Réchauffement de composants de l'équipement</li> </ul>
10	Normes et standards	Toutes les conditions et restrictions en matière de santé et sécurité, d'assemblage, normes légales et autres en lien avec le système.	Respect des normes et standards de Santé et Sécurité : <ul style="list-style-type: none"> <li>– Du C2MI</li> <li>– En milieu de travail et d'étude (SSMTE) de l'UdeS / 3IT</li> <li>– Pour le développement et l'utilisation d'un équipement automatisé selon les termes d'IBM</li> </ul>

⋮

⋮

N°	Élément du milieu extérieur	Description	Caractéristiques
11	Milieu / Environnement	L'environnement et contexte d'utilisation du système.	Localisation : – Laboratoire de Développement de nouveaux équipements du C2MI à accès limité
12	Équipements et solutions technologiques imposés	Tous les concepts et solutions technologiques initialement retenus et proposés par la précédente recherche, incluant les modules à assembler, à fabriquer et/ou à compléter [20].	– Voir l'annexe A
13	Critères de qualité	Tous les critères et exigences pour qualifier la valeur ajoutée auxquels le système doit satisfaire.	– Voir le tableau 3.3
14	Critères opérationnels	Tous les critères et exigences concernant les conditions d'opération et de performance auxquels le système doit satisfaire	– Voir le tableau 3.3

*Fin du tableau*

### 3.3.2 Fonctions de service

L'identification des fonctions de service s'effectue à l'aide de l'outil graphique : le graphe des interacteurs ou graphe fonctionnel (de la méthode APTE). Cet outil distingue deux types de fonctions de service : fonctions principales et fonctions contraintes.

#### Fonctions principales (FP) (ou fonction d'usage)

Ce sont les fonctions qui satisfont le besoin. Elles représentent les raisons pour lesquelles le produit est conçu. Dans le graphe des interacteurs, la fonction principale met en relation deux EME (ou plus) via le produit.

#### Fonctions contraintes (FC)

Selon la norme AFNOR (NF EN 16271), la contrainte « est la limitation à la liberté de choix du concepteur réalisateur du produit ». Elle traduit généralement une adaptation du produit à son milieu extérieur, mais elle ne représente pas nécessairement sa raison d'être. Dans le graphe des interacteurs, la fonction de contrainte met en relation le produit et un seul EME.

Finalement, les fonctions recensées sont exprimées et caractérisées selon la norme de l'AFNOR (NF EN 16271). Le tableau 3.2 spécifie les différents niveaux de flexibilité utilisés pour une FS tels que définis par la norme. Enfin, tout le travail de cette analyse fonctionnelle a conduit à la rédaction du CdCF de l'automatisme du Métallographe 3D, donné au tableau 3.3.

Tableau 3.2 Définitions des classes de flexibilité selon l'AFNOR

Classe	Flexibilité	Négociabilité
F0	Nulle	Impératif
F1	Faible	Peu négociable
F2	Bonne	Négociable
F3	Forte	Très négociable

Tableau 3.3 Cahier des charges fonctionnel du Métallographe 3D

N°	Fonction de service	Critère(s)	Niveau	Flexibilité Lim. Cl.	
EME-1 : Utilisateur					
FP1	Permettre à un utilisateur de réaliser des cycles d’analyses métallographiques pour produire des données en trois dimensions des grains d’un C4				F0
FP2	Prendre en compte des commandes d’opération de l’utilisateur	Temps de réponse	250 ms	Max	F1
FP3	Informar l’utilisateur sur l’état des opérations	Temps de réponse	250 ms	Max	F1
FP4	Permettre à l’utilisateur de récupérer et manipuler les données métallographiques				F0
FP5	Permettre à l’utilisateur d’ajuster et sélectionner la région à caractériser du plan de l’échantillon	Précision d’ajustement	1 µm	Min	F0
FP6	Permettre à l’utilisateur d’observer le plan d’inspection durant l’ajustement	Distance entre l’élément visuel et les commandes	1 m	Max	F1
FP7	Permettre à l’utilisateur d’approvisionner les paramètres d’une analyse métallographique	Persistance Extensible Modifiable			F2 F2 F2
FP8	Permettre à l’utilisateur d’installer la matière d’œuvre	Équipement opérable lors de l’installation			F1
FP9	Permettre à l’utilisateur de couper rapidement les sources d’alimentation critiques du système	Temps de coupure Distance du mécanisme de coupure	50 ms 1 m	Max Max	F0 F0
FP10	Permettre à l’utilisateur d’opérer l’équipement dans l’ordre (utilisation normale) ou le désordre (conception, tests d’intégration et maintenance)	Nb. de modes d’opération Nb. de commandes Nb. d’indicateurs	2 10 10	Min Min Min	F0 F0 F0
FC1	Posséder une interface ou console utilisateur				F0
EME-2 : Sources d’alimentation					
FC2	Être alimentés en électricité, en air comprimé et en eau compatible avec le réseau du C2MI	Compatibilité	Absolu		F0
FP11	Être électriquement et mécaniquement isolé	Isoler les sources dangereuses	Absolu		F0

:

⋮					
N°	Fonction de service	Critère(s)	Niveau	Flexibilité	
				Lim.	Cl.
FP12	Acheminer les sources d'alimentation aux différents organes opératifs du système	Air comprimé ajustable Pression d'eau ajustable Débit d'eau ajustable	10 - 80 psi 10 - 30 psi 4L/min	Min Min Min	F1 F1 F1
<b>EME-3 : Échantillon</b>					
FC3	S'adapter à des échantillons de tailles et dimensions variables	Voir tableau 3.1			F0
<b>EME-4 : Matières d'œuvre</b>					
FC4	Supporter la matière d'œuvre				F0
FP13	Réguler et distribuer la matière d'œuvre aux effecteurs				F0
<b>EME-5 : Déchets &amp; Résidus</b>					
FP14	Contenir les résidus et déchets produits par le système				F0
<b>EME-6 : Données métallographiques</b>					
FC5	Sauvegarder un grand volume de données	Volume	60 Go	Min	F1
<b>EME-7 : Commandes et informations</b>					
FP15	Fournir un compte rendu de l'état des déchets & résidus cumulés dans la machine	Niveau d'indication	80 % de la capacité maximale	Max	F0
FP16	Connaître l'état de chaque capteur et actionneur de l'équipement				F0
FC6	Posséder une interface pour communiquer ou transmettre des informations	Être modulaire			F1
FC7	Posséder une interface pour transmettre des commandes	Être modulaire			F1
FC8	Gérer des commandes dans l'ordre (utilisation normale) et le désordre (développement, intégration et maintenance)				F0
<b>EME-8 : Paramètres d'opération</b>					
FC9	Posséder une interface pour régler les paramètres du procédé et système	Être modulaire			F1
<b>EME-9 : Phénomènes perturbateurs</b>					
⋮					

⋮

N°	Fonction de service	Critère(s)	Niveau	Flexibilité Lim.	Cl.
FC10	S'adapter aux phénomènes physiques perturbateurs pouvant nuire à la qualité des données produites				F2
<b>EME-10 : Normes et standards</b>					
FC11	Respecter les normes et standards en matière de sécurité du C2MI, d'IBM et de l'UdeS				F0
FC12	Respecter les normes et standards d'IBM en matière de montage électrique et de sécurité machine				F0
FC13	Protéger (utilisateur, composants, sous-systèmes, etc.)				F0
<b>EME-11 : Milieu / Environnement</b>					
FC14	Respecter les exigences environnementales du C2MI et du laboratoire				F0
<b>EME-12 : Équipements / Solutions technologiques imposées</b>					
FC15	Utiliser les solutions technologiques et équipements développés et en possession				F1
FC16	Intégrer l'ensemble de l'équipement opératif				F0
FC17	Piloter les organes opératifs				F0
<b>EME-13 : Critères de qualité</b>					
FC18	S'adapter aux critères de qualité	Précision des avances de coupe Résolution spatiale Volume d'inspection	1 $\mu\text{m}$ 1 $\mu\text{m}^2$ 200x200x200 $\mu\text{m}^3$	Min Min Min	F1 F0 F0
<b>EME-14 : Critères opérationnels</b>					
FC19	S'adapter aux critères opérationnels	Cadence Modes d'opération	6 sections/heure Auto. / Manuel	Min Min	F1 F0
FP17	Posséder des séquences automatisées pour les différentes étapes d'un cycle d'analyses métallographiques	Séq. de préparation surface Séq. de nettoyage Séq. de caractéristique Séq. de prise et dépôt d'échantillon	Absolu Absolu Absolu Absolu		F0 F0 F0 F0

*Fin du tableau*

## 3.4 Analyse fonctionnelle technique

L'analyse fonctionnelle technique ou l'analyse fonctionnelle interne fait la transition entre l'analyse fonctionnelle du besoin et la conception détaillée. Elle permet une approche systémique pour la recherche de solutions technologiques aux fonctions techniques. Par définition, une fonction technique « est une fonction qui contribue à la réalisation d'une fonction de service par un moyen technique » [21].

L'objectif de cette section est de concentrer les analyses d'ordre technique concernant l'élaboration de l'automatisme et la complétion du Métallographe 3D. Cette section spécifie les principaux choix technologiques retenus. Les prochains volets de cette section traitent, dans cet ordre, des sujets suivants :

- Analyse des opérations et interactions utilisateur-machine ;
- Analyse des modes et états d'opération ;
- Analyse de risques et sécurité machine ;
- Décomposition fonctionnelle complète du système final ;
- Concept et architecture de la PC.

### 3.4.1 Opérations et interactions utilisateur-machine

Après une étude approfondie du processus métallographique du concept initial, il est observé que plusieurs interventions sont nécessaires au cours d'une telle séance. Ces interventions complexifient et réduisent l'autonomie de la PC puisque certaines séquences du système resteront dépendantes de l'habileté de l'opérateur. Afin d'évaluer les contraintes et limites que cela peut occasionner à la PC, l'analyse des étapes et séquences du processus a permis d'identifier l'ensemble des opérations qu'un utilisateur doit effectuer avant, pendant et après un processus d'analyses métallographiques 3D. Le tableau 3.4 résume le résultat de ce travail.

Au tableau 3.4, il est apparent que l'utilisateur doit parfois accéder à l'intérieur de la machine. Par conséquent, celui-ci s'expose à la zone dangereuse de l'équipement. De plus, quelques-unes de ces interventions nécessitent que des composantes opératives, considérées dangereuses (p. ex. robot, table de polissage, etc.), demeurent sous énergie, ce qui implique inévitablement un risque de danger élevé pour l'opérateur. Notamment pour ces raisons et par souci de santé et sécurité, les entités responsables du projet (C2MI, UdeS et IBM) ont exigé la réalisation de plusieurs analyses de risques selon leurs modalités. Ces analyses ont dirigé le projet sur certains choix et fonctions techniques discutés à la section 3.4.3.

---

Par la suite, une autre constatation de la liste des interactions est que l'opérateur doit ajuster et transmettre plusieurs paramètres au système. Ceci implique assurément l'usage d'interfaces utilisateurs, autrement dit des interfaces humain-machine (IHM), supplémentaires à ceux du concept initial (seulement des stations de boutons). Pour ajouter, plusieurs composants du système doivent se trouver à une position ou un état connus (p. ex. plateau rotatif, axes moteurs du microscope, robot, etc.) et la PC n'a pas la capacité de piloter certains d'entre-eux (contraintes de l'équipement imposé).

Tableau 3.4 Sommaire des interactions utilisateur-machine pour différents stades du processus ou cycle métallographique (pré-, inter-, post-processus)

Stade du processus	Interaction utilisateur-machine
Pré	Mesurer et fournir l'épaisseur initiale de l'échantillon et de son emplacement de travail (localisation) dans le porte-échantillon
Pré	Ajuster et préparer le plan initial de travail de l'échantillon
Pré	Prérégler les paramètres de contrôle machine (pressions, coordonnées relatives de l'équipement, etc.)
Pré   Inter	Fournir et ajuster les paramètres de recette du processus
Pré   Inter	Déplacer manuellement le plateau rotatif de la station de préparation de surface à sa position de référence
Pré	Aligner manuellement l'axe Y du microscope pour positionner l'échantillon dans le champ optique du microscope
Pré	Mesurer et fournir la position de l'axe Y de la station de caractérisation par rapport à une position de référence
Pré	Déterminer et fournir la position relative du sous-système de caractérisation par rapport au bras manipulateur (station découplée de la structure principale)
Pré	Déterminer la région à caractériser depuis l'échantillon (position relative aux axes X, Y et Z du microscope)
Pré   Post	Mise sous/hors énergie de l'équipement
Pré   Inter   Post	Installer, changer et récupérer la matière d'œuvre aux stations de préparation de surface et de nettoyage
Pré   Inter   Post	Produire, récupérer et manipuler des données métallographiques (images, mesures, positions, paramètres, etc.)
Pré   Inter	Démarrer et arrêter des séquences
Pré   Inter   Post	Nettoyer et lubrifier les stations

### 3.4.2 Modes et états opérationnels

Afin de concevoir un système automatisé, il est essentiel de prévoir dès le début de la conception toutes les situations de marche et d'arrêt de l'équipement. Pour les besoins du projet, seules les situations jugées essentielles au bon fonctionnement du système, fondées sur l'analyse des opérations, sont retenues. La recherche des modes opérationnels de l'équipement s'est principalement basée sur l'outil GEMMA (Guide d'étude des modes de marche et d'arrêt) élaboré par l'ADEPA (Agence nationale pour le développement de la



production automatisée). Brièvement, le GEMMA est un document structuré permettant une approche guidée et systématique. Cette méthode permet d'exprimer clairement les besoins en mode de marche et d'arrêt d'un système automatisé. L'annexe B donne un exemplaire de cet outil graphique. Le GEMMA se divise en deux zones distinctes :

- La PC hors énergie,
- La PC sous énergie.

À la PC sous énergie, le GEMMA définit trois familles de procédures :

- Les procédures de fonctionnement (F),
- Les procédures d'arrêt (A),
- Les procédures en défaillance (D),

ainsi que les zones de production et hors production. Dans le cas du projet, la zone de production est considérée comme étant la phase d'utilisation normale de l'équipement. Après quelques révisions du GEMMA, l'étude conclut que les modes présentés au tableau 3.5 sont indispensables au bon fonctionnement du système.

Tableau 3.5 Liste des procédures de marche et d'arrêt retenues

Repère	Désignation	Description
F1	Production normale	Cet état permet au système de fonctionner normalement : c'est l'état pour lequel il est conçu.
F4	Marche de vérification dans le désordre	Cet état permet la vérification dans le désordre des différents actionneurs du système automatisé sans nécessairement respecter l'ordre de fonctionnement normal. Cet état correspond le plus souvent au mode manuel.
A1	Arrêt dans l'état initial	Cet état indique que le système est arrêté à son état initial ou de repos. C'est à cet état que le système se trouve avant de passer à un mode de production normale ou tout autre mode de marche.
A5	Préparation pour remise en route après défaillance	Cet état permet de rétablir le système après une défaillance dans une position qui lui permettra de remettre en route le système. L'opérateur doit parfois manuellement intervenir pour dégager, nettoyer ou vider le système.
A6	Mise de la PO dans l'état initial	Cet état permet de ramener le système manuellement ou automatiquement à une position initiale, soit à un état connu et reconnu par le système.
D1	Arrêt d'urgence	Cet état permet de gérer le système lors d'un arrêt d'urgence.

### 3.4.3 Analyse de risques et sécurité machine

Comme discuté à la section 3.4.1, certaines opérations du processus métallographique impliquent l'utilisation d'équipement et de matériels comportant un degré de risque à la santé et sécurité de l'utilisateur. C'est pourquoi, il a nécessité la réalisation de deux analyses de risques : 1) une analyse avec l'aide du groupe d'IBM selon leurs standards ; 2) une ana-

lyse selon le modèle du Laboratoire de caractérisation des microsystèmes et de synthèse des matériaux (LCSM) de l'Institut interdisciplinaire d'innovation technologique (3IT) de l'Université de Sherbrooke. Ces analyses ont permis d'identifier les dangers, d'évaluer et caractériser les risques, et de déterminer et valider les moyens de prévention en lien avec l'équipement et de son utilisation. Ces rapports sont donnés sous la forme de documents numériques avec ce mémoire.

Notamment, ces analyses ont contraint certaines fonctionnalités du système en ce qui concerne l'alimentation énergétique de l'équipement opératif. Pour répondre aux exigences de sécurité, l'équipement de métallographie s'est muni de technologies de sécurités et de protections respectant un niveau de sécurité de catégorie 4 tel que défini par la norme internationale ISO-13849-1. De plus, la sélection de composants, le câblage et la réalisation des cabinets électriques suivent plusieurs standards et normes canadiennes en matière de sécurité machine tels que ULC (Les Laboratoires des assureurs du Canada), CSA (Association canadienne de normalisation), ISO (Organisation internationale de normalisation) et IEC (Commission électrotechnique internationale). Bref, le tableau 3.6 résume les fonctions primaires de sécurité retenues pour l'équipement de métallographie.

Tableau 3.6 Fonctions de sécurité du système de Métallographie 3D

Fonction de sécurité	Solution technique	Description
Arrêt d'urgence	Boutons d'arrêt d'urgence et technologie câblée redondants de CAT. 4	Provoque un arrêt momentané en coupant toutes les sources d'énergie et d'opérations dangereuses
Réarmement	Bouton de réarmement et technologie câblée de CAT. 4	S'assure que les conditions de sécurité sont conformes pour la mise sous énergie de la PO à la suite d'un arrêt d'urgence ou la mise hors route de celle-ci
Détection de l'ouverture des portes	Interrupteurs de sécurité et technologie programmée de sécurité CAT. 4	Surveille l'état des portes du niveau supérieur de l'enceinte donnant accès à la PO au potentiel dangereux
Activation de l'énergie opérative	Technologie programmée et câblée de sécurité de CAT. 4	Contrôle les préactionneurs distribuant l'énergie à l'ensemble de la PO
Sélection de modes	Technologie programmée de sécurité de CAT. 4	Surveille l'état du sélecteur de mode opérationnel de l'équipement (auto. / manu.)
Détection de fuite d'eau	Détecteur d'eau et technologie câblée	Surveille la présence d'eau dans la cuve de rétention et coupe la ligne principale d'eau en cas de fuite
Détection de trop-plein	Interrupteur à flotteur et technologie câblée	Surveille un seuil d'eau dans la cuve de nettoyage et coupe la ligne principale d'eau en cas de trop-plein

### 3.4.4 Description fonctionnelle du système final

Par la suite, une autre étape essentielle pour le design d'un système automatisé est la classification et la définition de chaque constituant opératif et de commande impliqué dans le processus automatisé. Pour chacun des composants fonctionnels, ce travail a cherché à définir précisément le rôle ; assigner un repère ; identifier toutes les conditions d'opération, limites et initiaux (p. ex. sous/hors énergie, active/inactive, états logiques, etc.). L'objectif des sections ci-après est de présenter : 1) le système métallographique et sa décomposition finale ; 2) les composants et structures fonctionnels ; 3) une discussion des solutions technologiques décisives retenues pour compléter la PC.

#### Système et sous-systèmes finaux

Afin de modéliser le Métallographe 3D final en lien avec son milieu extérieur, un travail de conceptualisation a donné lieu à l'actigramme de la figure 3.2. Cet actigramme met en évidence la frontière de la fonction globale du système (dans l'encadré) avec les principaux EME identifiés lors de l'analyse fonctionnelle (chapitre 3.3.1). À cette figure, les entrées sont indiquées à gauche du bloc, les sorties à droite, les éléments de contrôle au-dessus et les moyens en dessous. Enfin, les contraintes et exigences du système sont inscrites sur la figure à titre de complément.

À l'interne, le système est redécomposé stratégiquement en plusieurs sous-systèmes, par rapport à la décomposition initiale, pour inclure les nouvelles fonctionnalités identifiées et simplifier la conception de l'automatisme. Au final, le système de métallographie comprend neuf sous-systèmes. Le tableau 3.7 définit chacun de ces sous-ensembles.

Tableau 3.7 Définition des sous-systèmes du système final

Repère	Sous-système	Description
PSU	Alimentation électrique ( <i>Power Supply Unit</i> )	Regroupe l'ensemble des composants s'occupant de réguler, adapter et distribuer l'énergie électrique à la PO et PC
CASU	Alimentation pneumatique ( <i>Compressed Air Supply Unit</i> )	Regroupe l'ensemble des composants s'occupant de réguler, adapter et distribuer l'énergie pneumatique à la PO
WSU	Alimentation hydraulique ( <i>Water Supply Unit</i> )	Regroupe l'ensemble des composants s'occupant de réguler, adapter et distribuer l'énergie hydraulique à la PO
PRO	Sécurité et protection ( <i>Safety and Protection Unit</i> )	Regroupe l'ensemble des dispositifs possédant une fonction de sécurité et/ou de protection.
MAN	Manipulation	Regroupe l'ensemble de l'équipement opératif contribuant aux fonctions de déplacement et de manipulation de l'échantillon au cours des séquences. Il inclut, entre autres, le bras articulé à six axes, la pince pneumatique de préhension et le porte-échantillon.
POL	Préparation de surface	Regroupe l'ensemble de l'équipement opératif de la station de préparation de surface.
⋮		

⋮

Repère	Sous-système	Description
CLE	Nettoyage de surface	Regroupe l'ensemble de l'équipement opératif de la station de nettoyage.
CAR	Caractérisation de surface	Regroupe l'ensemble de l'équipement opératif de la station de caractérisation de surface.
CTRL	Commande et contrôle	Regroupe l'ensemble de l'équipement de commande, de contrôle, de dialogue (IHM), de communication, de traitement ainsi que les logiciels et programmes de conduite. Explicitement, ce sous-système représente la PC du système.

*Fin du tableau*

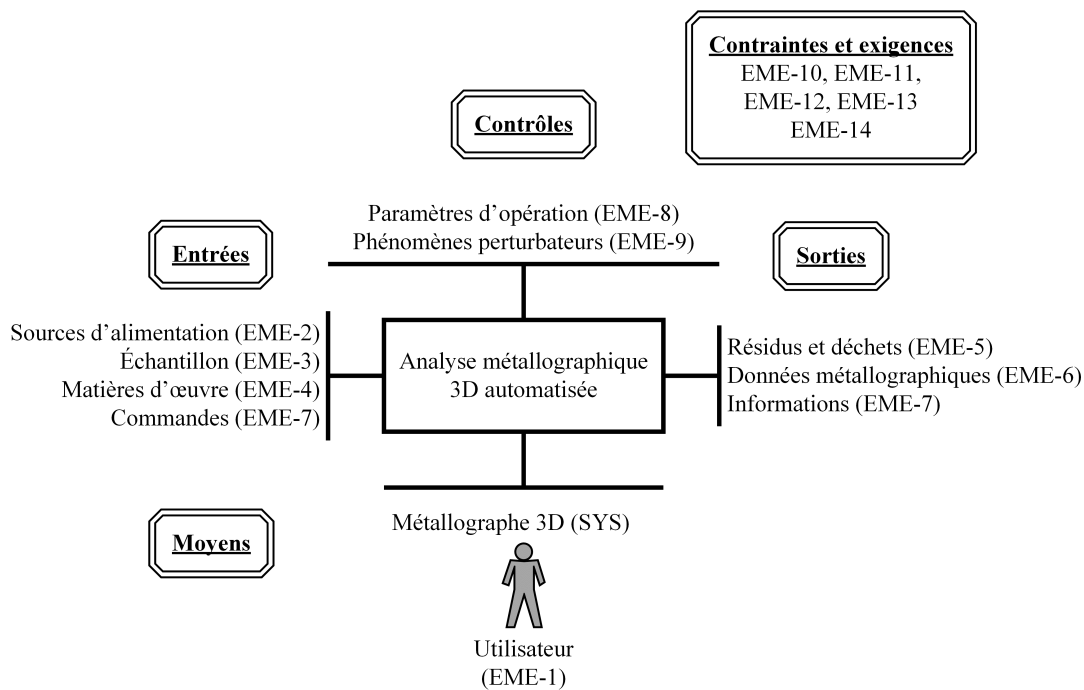


Figure 3.2 Représentation globale du Métallographe 3D avec son environnement extérieur

### Composants et structures fonctionnels

Pour continuer, un travail de classification a permis de créer et maintenir une liste ponctuelle de toutes les composants de la chaîne fonctionnelle du processus métallographique. Cette liste donne un aperçu authentique de l'ensemble et la quantité d'éléments que la PC doit gérer et piloter. Chaque constituant fonctionnel de cet inventaire est identifié ou caractérisé par les éléments suivants :

- Repère unique ;
- Nom du fabricant ;
- Numéro de produit ;

- Rôle fonctionnel ;
- Annotation du nombre d’entrées/sorties ;
- Sous-système associé ;
- Description et spécifications générales ;
- Mention si ajouté au système initial.

Les tableaux C.1 et C.2 en annexe résument ce long et fastidieux travail. Le tableau 3.8 présente un bilan général de la composition fonctionnelle du Métallographe 3D à son état final. À partir de ce point-ci, les repères uniques définis aux tableaux de l’annexe C serviront comme moyen de référence pour désigner un composant spécifique.

Pour continuer, ce travail a également réalisé des schémas synoptiques de tous les sous-systèmes dans le but de décrire réellement la structure fonctionnelle de l’outil final. Étant donné le nombre important de schémas que ce travail a occasionné, ceux-ci sont donnés à l’annexe D. Ces diagrammes offrent une vue d’ensemble sur : les différents types de connexion des organes opérationnels ; les différentes chaînes fonctionnelles ; les signaux de contrôle ; les effecteurs de chacun des sous-systèmes. Bref, en plus des schémas, l’annexe D contient également plusieurs tableaux descriptifs.

Tableau 3.8 Vue d’ensemble des constituants fonctionnels du Métallographe 3D

Élément fonctionnel	Total
Sous-systèmes	9
Capteurs	25
Préactionneurs	27
Actionneurs	15
Effecteurs	19
Unités logiques	8
Application de contrôle	4
IHM	37

### Survol des choix technologiques de la PC

Comme mentionné au chapitre 1, il a fallu compléter et assembler la PO et la PC du Métallographe 3D. Ces activités se sont exécutées parallèlement au design de l’architecture et programmation de la PC. Les paragraphes qui suivent survolent les principaux choix techniques retenus pour compléter cette dernière. Cependant, les choix technologiques retenus, en ce qui concerne la PO, ne sont pas discutés davantage dans ce document puisqu’ils ne représentent pas l’objectif principal du projet, même s’il était inévitable et nécessaire de finaliser cette partie.

La PC du projet initial comptait au total trois modules de contrôle (PLC, STL et RJ3-CTRL). Les unités STL et RJ3-CTRL étant dédiées à des tâches spécifiques (pilotage de l'équipement de sécurité / déplacement et manipulation robot), seule l'unité PLC servait de module de traitement et de commande. Or, la PC manquait forcément d'IHM et d'interfaces de communication pour arriver à faire fonctionner l'ensemble de l'équipement depuis une seule unité de contrôle. Pour répondre à ce manque, il a été décidé d'ajouter quelques composants réseautiques en plus d'un nouveau module de contrôleur, c'est-à-dire un ordinateur Windows (WPC). Ces ajouts ont permis de répondre à plusieurs fonctionnalités manquantes :

- Recevoir et gérer des paramètres de l'utilisateur ;
- Agir en tant que console utilisateur ;
- Afficher de l'information sur l'état général du système, des sous-systèmes, composants, opérations, etc. ;
- Commander manuellement les organes opératifs ;
- Visualiser en continu un flux vidéo de la caméra numérique ;
- Agir comme unité de stockage (images et données) ;
- Dialoguer avec le logiciel de contrôle PLC ;
- Se servir des bibliothèques tierces de CAM-1, Z-PROBE, SMRM-1 (-2) ;
- Effectuer certaines opérations de manière asynchrone et de longue durée difficiles à réaliser sur les autres modules de contrôle (p. ex. manipulation et traitement d'images, gestion des paramètres, etc.).

La composition finale de la PC a abouti à une structure singulièrement distribuée, avec plusieurs unités logiques et une multitude d'interfaces homme-machine comme points de contrôle et de commande. Chaque unité de contrôle réalise sa logique par l'intermédiaire d'une technologie câblée ou programmée. La figure 3.3 conceptualise la structure fonctionnelle finale de la PC. Les prochains chapitres expliquent l'architecture et la conception détaillées des applications de contrôle des unités logiques programmées formant l'automatisme du Métallographe 3D (UL-SAFETY, UL-CPS, UL-MODPC et UL-ROBOT). Les autres fragments de la figure 3.3 sont des unités logiques câblées et ne sont pas discutés davantage mais sont reflétés dans les schémas synoptiques de l'annexe D.

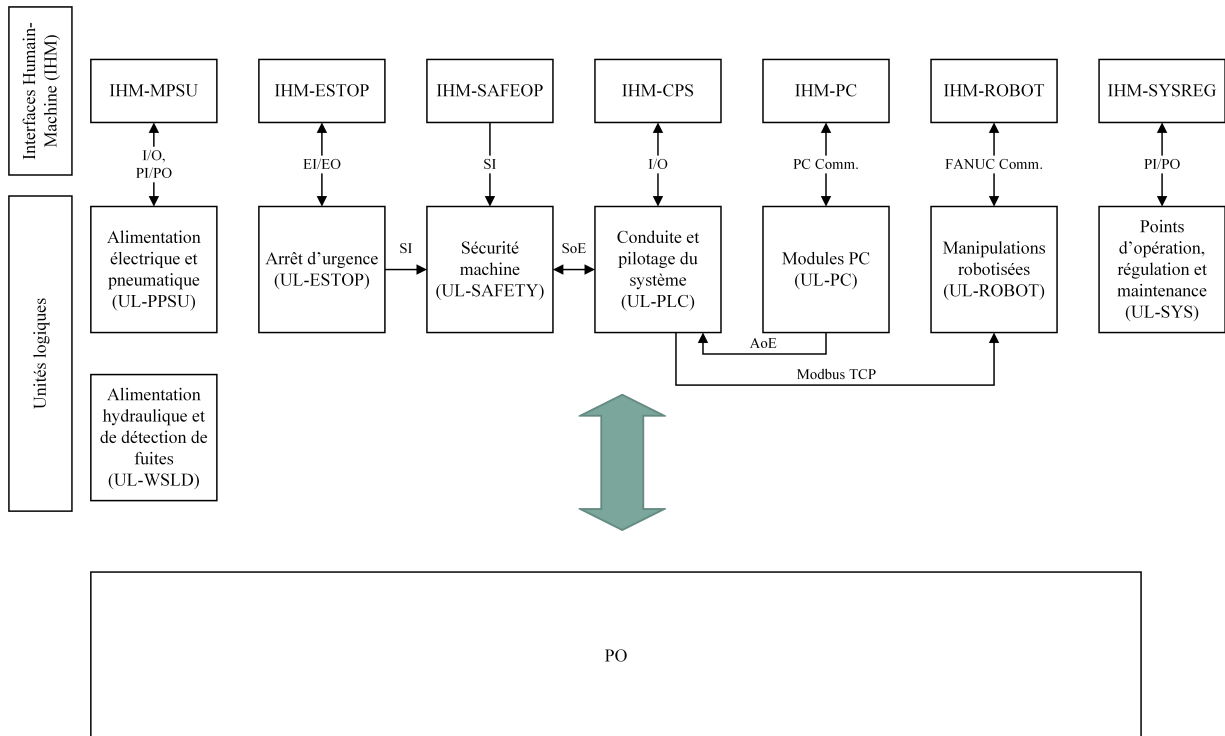


Figure 3.3 Structure fonctionnelle des unités de logique et IHM de la PC





# CHAPITRE 4

## CONCEPTION DE L'AUTOMATISME

La conception et la réalisation de la logique de contrôle du Métallographe 3D ont constitué les parties les plus laborieuses et volumineuses du projet. Lors de la phase de développement, l'intégration de composants ayant de fortes dépendances logicielles a rendu la première version de l'application de contrôle difficilement maintenable et peu flexible par la faute d'une première architecture trop simpliste et monolithique. Après quelques recherches et recommandations, il a été décidé de restructurer l'application de contrôle en suivant l'approche d'ingénierie agile de conception pilotée par le domaine [23] ou *Domain-Driven Design* (DDD). Cette méthode a notamment servi à créer l'architecture de base de l'automatisme et à décomposer celui-ci d'un point de vue systémique et logique.

Selon la philosophie DDD, le système automatisé du Métallographe 3D, c'est-à-dire l'intégralité des unités de contrôle distribuées, représente le domaine. L'approche DDD a permis de décomposer les programmes de l'application de contrôle en plusieurs sous-domaines et puis en plusieurs contextes. La figure 4.1 illustre conceptuellement l'organisation structurelle de la logique de contrôle programmée de l'automatisme final. À cette figure, trois sous-domaines sont identifiables :

1. Logique de contrôle de conduite et pilotage ;
2. Logique de contrôle des modules PC ;
3. Logique de contrôle des manipulations robotisées.

Ces sous-domaines représentent, en réalité, les frontières physiques des trois principales applications de contrôle de l'automatisme (omettant l'application de sécurité). Chaque bloc de la figure 4.1 représente un contexte qui est spécifiquement isolé ou encapsulé des autres contextes. Les flèches indiquent le moyen utilisé pour échanger entre deux contextes et spécifie également son affinité.

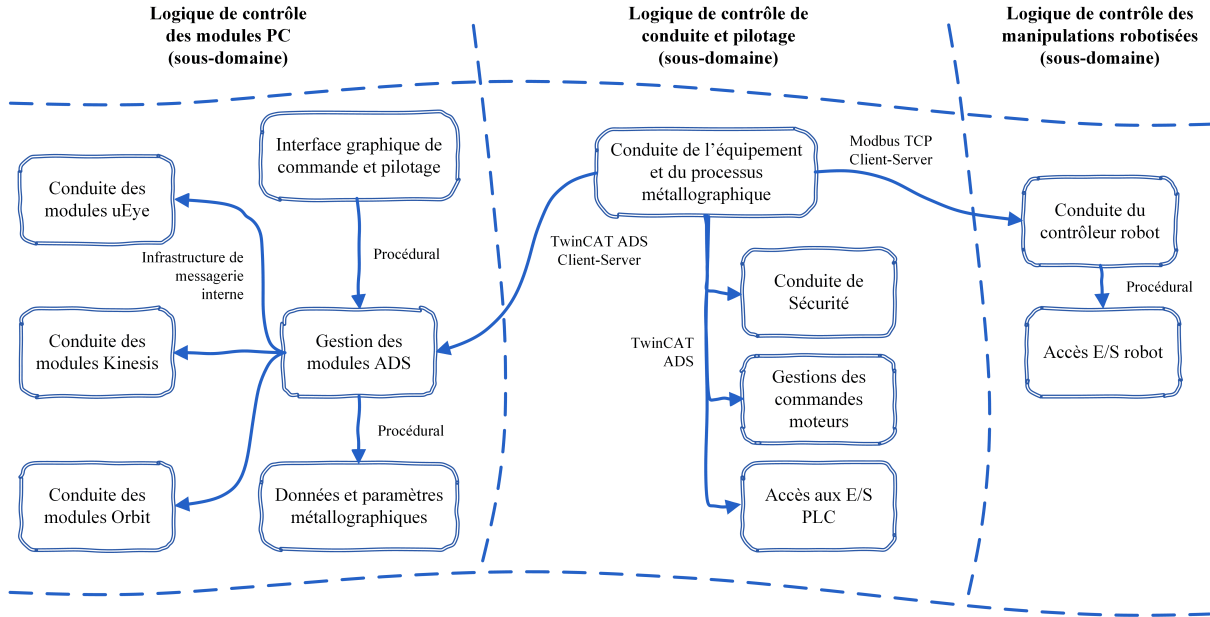


Figure 4.1 Cadre relationnel de la logique de contrôle programmée et distribuée de l'automatisme du Métallographe 3D

## 4.1 Conduite et pilotage

L'unité logique Conduite et pilotage du système (UL-CPS) comprend l'ordinateur embarqué (PLC) et l'application de contrôle TwinCAT, baptisée *Metallograph-v4.94*. Cette application est un projet du logiciel TwinCAT 3 (*The Windows Control and Automation Technology*) installé sur l'automate. Cette unité s'occupe de gérer la conduite et la supervision globale du système, des sous-systèmes, des composants locaux et distants. Elle se charge également de l'enchaînement logique et de l'exécution des séquences du processus métallographique. La figure 4.1 montre que la logique de contrôle de conduite du Métallographe 3D contient plusieurs contextes. En réalité, ces contextes représentent les principaux programmes de l'application qui s'exécutent parallèlement dans l'environnement TwinCAT du PLC. Les sections suivantes ont comme objectif de présenter ces différents contextes et de discuter de l'architecture et des entités maîtresses des programmes qui concrétisent la conduite du système. De plus, les principales configurations ayant une influence significative sur la qualité et la performance du processus métallographique sont également présentées.

### 4.1.1 Architecture de l'application TwinCAT

Avant d'examiner les programmes de l'application TwinCAT, il est pertinent de connaître le mode de fonctionnement de TwinCAT. D'abord, le logiciel TwinCAT comprend un environnement de développement XAE (*eXtended Automation Engineering*) et un environnement d'exécution XAR (*eXtended Automation Runtime*). Ces environnements se dé-

composent eux-mêmes en plusieurs modules qui matérialisent les différentes fonctionnalités du logiciel. La figure 4.2 illustre sommairement ces deux environnements.

Ensuite, un projet TwinCAT est formé de différents modules, types de projet (p. ex. projet PLC, NC, etc.), configurations système, etc. L'application TwinCAT du Métallographe 3D utilise cinq modules : SYSTEM, MOTION, PLC, SAFETY et I/O. Ces différents contextes logiques communiquent entre eux par l'intermédiaire de la couche de transport ADS (*Automation Device Specification*) originaire de TwinCAT. Cette technologie est très importante et est à la base de l'infrastructure de communication entre l'application TwinCAT et l'application PC. Pour cette raison, l'annexe E présente brièvement cette technologie et les fonctionnalités qui ont permis de développer le mécanisme de communication entre les deux applications distribuées. Bref, pour plus de détails sur les fonctionnalités et concepts du logiciel TwinCAT, il est suggéré au lecteur de consulter les ressources en ligne de Beckhoff [50].

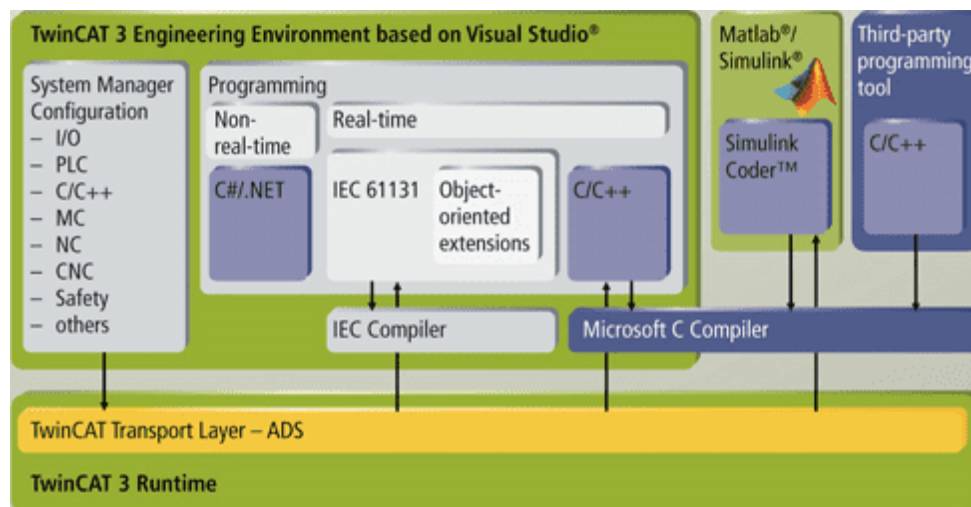


Figure 4.2 Représentation graphique des environnements du logiciel TwinCAT 3 [50]

#### 4.1.2 Structure et fonctionnement

Globalement, l'application TwinCAT du Métallographe 3D comprend trois projets : 1) un projet PLC (PLC\_Metallograph); 2) un projet NC (NC-Task); 3) et un projet de sécurité (TwinSAFE\_Project), et quatre tâches : une tâche PLC; une tâche NC; une tâche SAFETY; et une tâche I/O. Toutes ces tâches s'exécutent sur le CPU de l'ordinateur Beckhoff, à l'exception de la tâche de sécurité qui s'exécute dans le terminal de sécurité (STL). Chacune de ces tâches s'exécute en parallèle, à un temps de cycle et degré de priorité différents.

Le logiciel TwinCAT possède deux modes d'opération : **Config mode** et **Run mode**. Lorsque TwinCAT passe du mode **Config** au mode **Run**, celui-ci charge automatiquement les configurations système et démarre les serveurs, les communications, les composants du *Runtime* ainsi que les tâches définies dans **SYSTEM** à l'exception de la tâche PLC. Pour que cette dernière s'exécute, celle-ci doit être chargée dans l'environnement d'exécution et fixée à un port ADS spécifique. Ce concept est important, car il s'agit du point de liaison et d'entrée entre l'application de contrôle et l'application de commande PC. Bref, la figure 4.3 schématise simplement le contexte d'exécution de l'application TwinCAT pour les différentes tâches ainsi que leurs temps de cycle d'exécution.

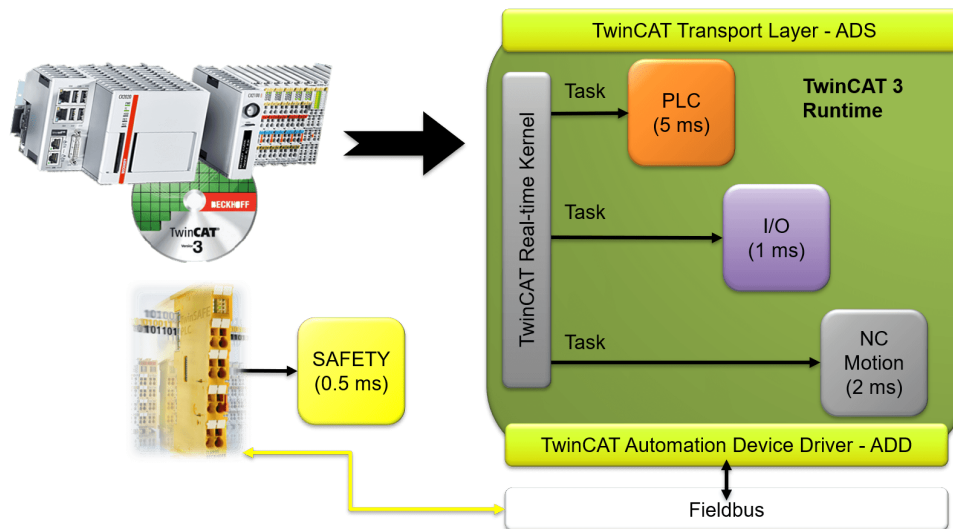


Figure 4.3 Concept de l'environnement d'exécution des tâches de l'application de contrôle PLC

### 4.1.3 Application de sécurité

L'application et la carte de sécurité (STL) forment l'unité logique de sécurité machine (UL-SAFETY). Le programme de sécurité consiste en un projet TwinSAFE du module SAFETY de l'application TwinCAT. La programmation de ce type d'application se fait uniquement au moyen des *Function Block* fournis par TwinSAFE et nécessite une configuration particulière des cartes d'entrées/sorties de sécurité. Comme mentionné, ce type de programme s'exécute dans le terminal logique de sécurité.

Essentiellement, l'architecture d'une application TwinSAFE se résume à trois couches telles que présentées à la figure 4.4. Pour accéder aux signaux d'entrée et sorties de sécurité, il faut définir des *Alias Devices*. Une fois configurés, ceux-ci peuvent alors se lier à des variables d'E/S standards d'un programme PLC.

Ensuite, un groupe TwinSAFE comprend un ou plusieurs blocs fonctionnels de sécurité. En ce qui concerne l'application de sécurité du projet, celle-ci possède un seul groupe. Chaque groupe TwinSAFE possède un signal logique de démarrage (RUN) et de reconnaissance d'erreur (ERR\_ACK). Ces signaux peuvent uniquement se lier à des variables d'E/S standards d'un programme PLC. Ceci est une contrainte importante du système puisque le programme de sécurité fonctionne uniquement si le programme PLC est en marche et si ce dernier a reconnu toutes les erreurs et a démarré le programme de sécurité. Pour donner une idée de la conduite, le tableau 4.1 décrit les différents états logiques pour lesquels un groupe TwinSAFE, c.-à-d. l'application de sécurité, peut se trouver.

Ceci étant dit, un ingénieur du groupe d'automation d'IBM et membre de l'OIQ, a testé, validé et signé le programme de sécurité et l'équipement de sécurité du Métallographe 3D de CAT. 4.

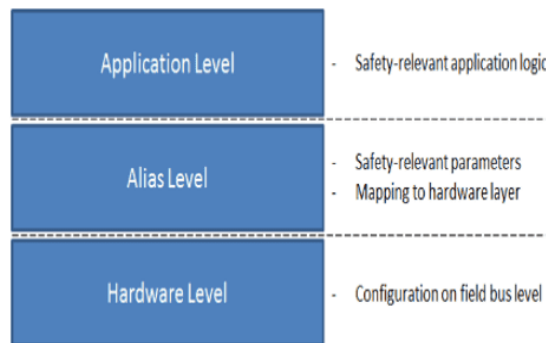


Figure 4.4 Architecture d'une application TwinSAFE [50]

Value	Status	Description
1	RUN	All function blocks and TwinSAFE connections assigned to the TwinSAFE group operate properly, and all TwinSAFE connections assigned to the TwinSAFE group are up and running
2	STOP	State after initialization
3	SAFE	All function blocks and TwinSAFE connections assigned to the TwinSAFE group operate properly, and at least one of the TwinSAFE connections assigned to the TwinSAFE group is not yet up and running
4	ERROR	At least one assigned function block or one assigned TwinSAFE connection has reported an error
5	RESET	A positive edge (FALSE->TRUE) for acknowledgement of a function block or a TwinSAFE connection error was detected on the ERR_ACK input. The system is waiting for the negative edge of the ERR_ACK input

Tableau 4.1 Présentation des différents états logiques d'un groupe de sécurité TwinSAFE [50]

#### 4.1.4 Application de commandes moteurs

Un autre contexte de l'application TwinCAT est la gestion des commandes moteurs du Métallographe 3D. Ce contexte fait référence au projet NC-Task du module MOTION.

L'appellation NC désigne *Numeric Control*. Ce projet prend en charge la configuration et la régulation de quatre commandes moteurs :

- **X Axis** - Axe linéaire en X du microscope motorisé ;
- **Z Axis** - Axe linéaire en Z du microscope motorisé ;
- **Abrasive Pump** - Pompe péristaltique distribuant le liquide abrasif ;
- **Lubricant Pump** - Pompe péristaltique distribuant le liquide lubrifiant.

Le programme PLC est lié symboliquement à ces objets, ce qui lui confère la capacité de superviser (position, vitesse, signaux, etc.) et de piloter les commandes moteurs (déplacement, arrêt, réinitialisation, etc.). Enfin, le tableau 4.2 résume les caractéristiques et configurations d'importance pour les axes linéaires du microscope motorisé. En ce qui concerne les commandes moteurs des pompes, seule la vitesse de référence est d'intérêt et celle-ci est réglée à 180 °/s, soit la vitesse maximale des moteurs (30 RPM).

Tableau 4.2 Paramètres de configuration NC pour les axes moteurs du microscope motorisé

Paramètres	Axe X	Axe Z
Type moteur	Pas-à-pas	Pas-à-pas
Pas par révolution	200	200
Micropas	1/64	1/64
Fréquence (pulses/sec)	2000	2000
Méthode de rétroaction	Compteur interne	Encodeur SinCos
$V_{max}$ (rotation/sec)	10	10
Vitesse de référence (mm/s)	10	5
<i>Slow jog</i> (mm/s)	0.1	0.01
<i>Fast jog</i> (mm/s)	3.0	2.0
Résolution <sup>1</sup> (mm/INC)	1/12800	1/512000
Pas minimal théorique (nm)	78.125	39.06
Zone de tolérance <sup>2</sup> (µm)	0.1	0.1

<sup>1</sup>Calculée selon les équations fournies par Beckhoff [50]  
<sup>2</sup>Zone dans laquelle la position est reconnue comme atteinte (*Dead band position deviation*)

#### 4.1.5 Application de conduite

Le cœur de la logique de conduite du système métallographique se trouve dans le projet PLC (PLC\_Metallograph) de l'application TwinCAT. Ce projet PLC constitue la partie la plus volumineuse et la plus importante de l'automatisme. En exploitant l'extension du standard IEC 61131-3 du logiciel TwinCAT 3, le développement du projet PLC a pu respecter une approche de programmation orientée objet et structurer ce dernier en

plusieurs entités logiques. À ce propos, l'application de conduite organise ces différents éléments fonctionnels en un ordre hiérarchique simple : système, sous-systèmes et modules (sous-modules). Cette décomposition suit de très près le modèle systémique présenté au chapitre 3.4.4.

Pour continuer, n'ayant pas de système de classification, tel que des espaces de nom (*namespace*), les dossiers du projet PLC organisent les différents programmes en groupes logiques. La figure 4.5 illustre l'organisation du projet `PLC_Metallograph` final. Le numéro en préfixe des dossiers symbolise l'ordre hiérarchique du groupe. Par exemple, le dossier `04_Application` incarne le plus haut niveau de l'application (c.-à-d. le programme exécutable) tandis que le dossier `00_State` représente le plus bas niveau (les modules de base, les structures de données globales, etc.) de l'application.

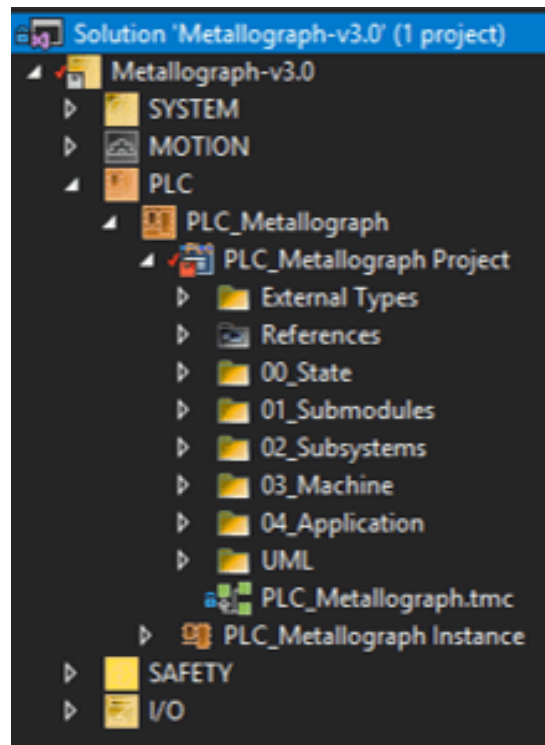


Figure 4.5 Présentation de l'arborescence du projet PLC

### Programme PLC

L'application PLC consiste en un unique programme, dénommé **MAIN**, qui s'exécute cycliquement depuis la tâche **PLC Task**. Cette tâche s'exécute précisément à toutes les 5 ms. Le programme **MAIN** déclare une seule instance du bloc fonctionnel (FB) système : **FB\_Metallograph**. Cet objet constitue l'intégralité du système logique du Métallographe 3D et celui-ci est décrit à la section suivante.



### Bloc-fonction système

Le bloc fonctionnel **FB\_Metallograph** compte plusieurs entités logiques. La figure 4.6 présente la composition de ce FB selon un diagramme UML. À cette figure, les FB de gauche sont des modules système, tandis que les FB de droite sont des sous-systèmes. Les sous-sections suivantes expliquent la responsabilité et les points saillants de ces principaux blocs-fonctions. La conduite logique de **FB\_Metallograph** se limite à l'exécution séquentielle de sept méthodes qui se répète à chaque cycle PLC. Le tableau 4.3 indique l'ordre d'exécution de ces fonctions et décrit brièvement le rôle de chacune d'entre elles.

Tableau 4.3 Description des principales méthodes invoquées cycliquement par le bloc-fonction système **FB\_Metallograph**

O.E. <sup>1</sup>	Méthode	Description
1	<b>Coldstart()</b>	Initialise le système (programme) une première fois lors du tout premier cycle PLC.
2	<b>Requests()</b>	Prend en compte les signaux d'entrée des boutons de commande physiques et de l'interface visuelle.
3	<b>Enable()</b>	Actualise les conditions d'activation/désactivation pour l'ensemble des boutons de commandes, des sous-systèmes et des modules.
4	<b>ModuleInputs()</b>	Actualise les entrées des FB sous-systèmes.
5	<b>InputOutput()</b>	Actualise les sorties des FB sous-systèmes selon les nouvelles entrées.
6	<b>StateMachine()</b>	Actualise la machine à états du système. Actualise l'exécution des opérations des différents blocs fonctionnels selon le nouvel état logique actuel.
7	<b>Visu()</b>	Actualise les entrées et sorties du FB de l'interface visuelle.

<sup>1</sup>Ordre d'exécution



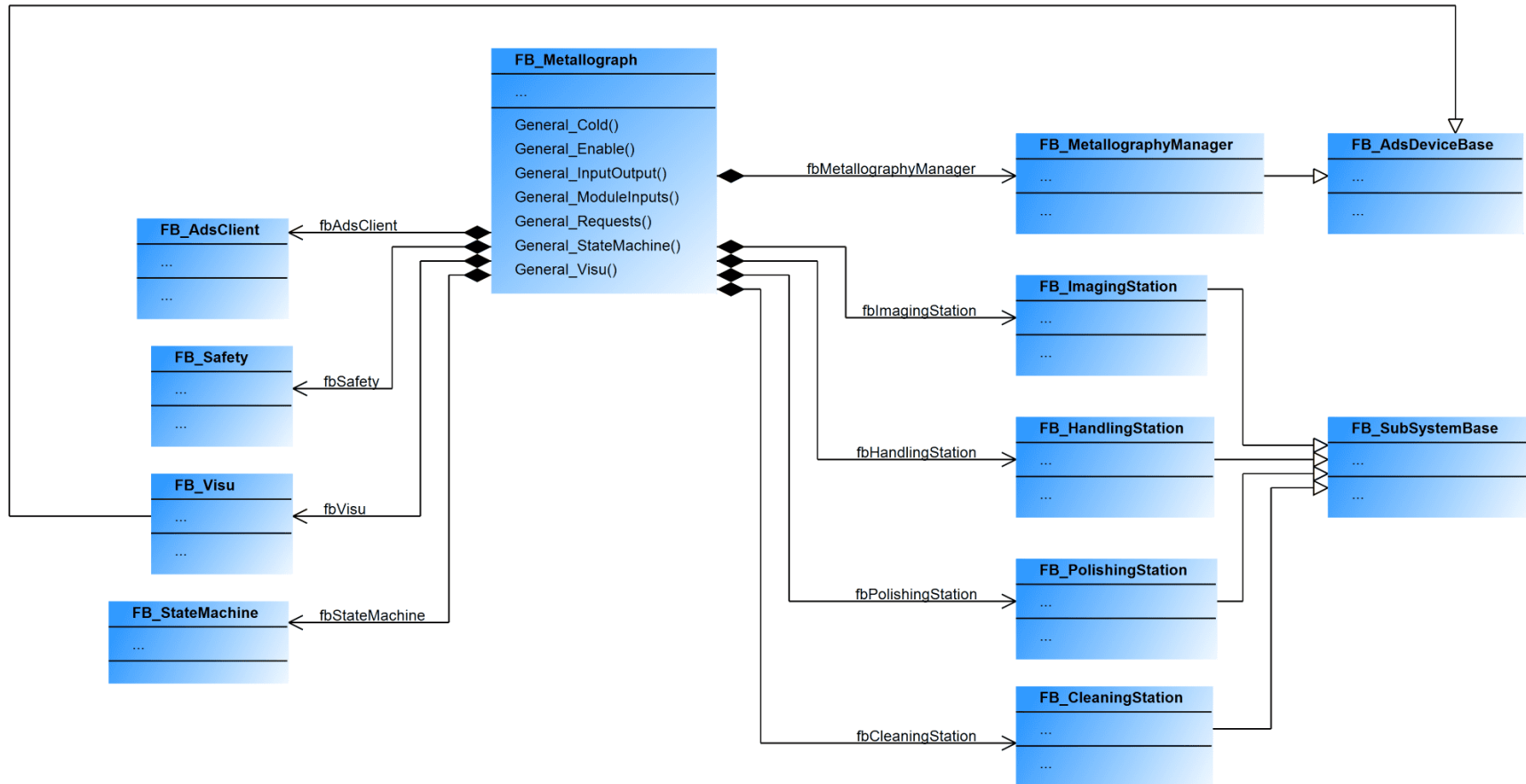


Figure 4.6 Diagramme de classe UML du bloc fonctionnel FB\_Metallograph

### Bloc-fonction machine à états

Le bloc-fonction `FB_StateMachine` s'occupe de changer l'état opérationnel du système en fonction des signaux logiques à son entrée. Ce bloc modélise les différents modes de marche et d'arrêt du système identifiés lors de l'analyse fonctionnelle interne au chapitre 3.4.2. La machine à états finale du système métallographique possède deux modes d'opération, automatique et manuel, pour lesquels sont définis neuf états et états-transitions. La figure 4.7 illustre conceptuellement la conduite de cette machine à états. Les modes automatique et manuel utilisent exactement le même modèle de machine à états, seules les conditions transitoires changent.

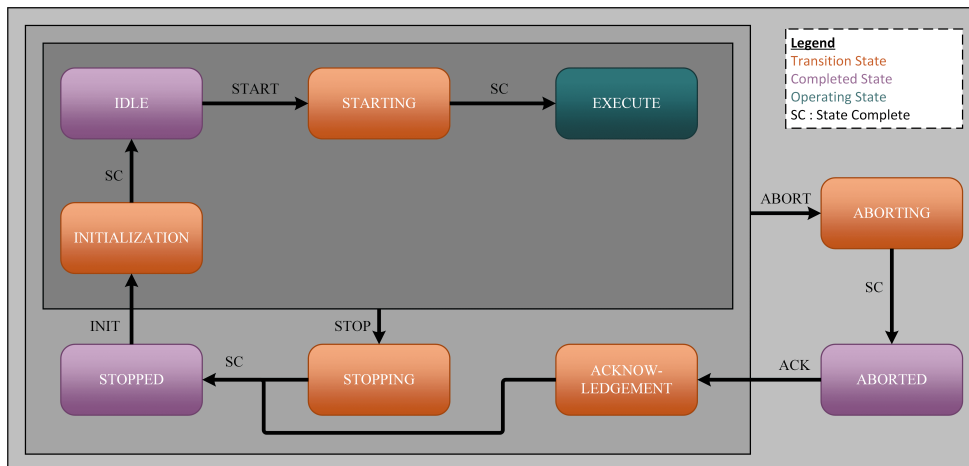


Figure 4.7 Machine à états du Métallographe 3D mise en œuvre par le bloc-fonction `FB_StateMachine`

Tableau 4.4 Conditions de transition pour la machine à états système

De l'état	À l'état	Conditions de transition
Aborting	Aborted	– Tous les sous-systèmes et leurs modules ont arrêté leurs opérations
Ack.	Stopped	Dans cet ordre logique : – Le module de sécurité a reconnu/effacé les erreurs et est à <b>RUN ET</b> – Tous les sous-systèmes et modules ont terminé leurs séquences de reconnaissance d'erreurs ( <i>reset</i> ) ET – Le module de sécurité a activé l'énergie opérative
Init.	Idle	– Tous les sous-systèmes ont terminé leur séquence d'initialisation et leurs modules sont à un état connu et d'attente ( <i>idle</i> )
Starting	Execute	– Tous les sous-systèmes ont terminé leurs séquences de démarrage
Stopping	Stopped	– Tous les sous-systèmes ont terminé l'exécution de leurs séquences d'opération et leurs modules sont à un état d'arrêt ou d'attente
Tous les états <sup>1</sup>	Aborting	– Lorsqu'un module système ou sous-système soulève une erreur OU – Lorsque le bouton <b>POWER</b> est désactivé

⋮

⋮

De l'état	À l'état	Conditions de transition
Execute		
Starting Init. Idle	Stopping	– Détection du front montant du bouton de contrôle STOP
Aborted	Ack.	– Détection du front montant du bouton de contrôle RESET
Stopped	Init.	– Détection du front montant du bouton de contrôle INIT
Idle	Starting	– Détection du front montant du bouton de contrôle START

<sup>1</sup>À l'exception de **Aborting** et **Aborted**

*Fin du tableau*

### Blocs-fonctions de base

Le projet PLC définit quelques blocs-fonctions et fonctions de base ainsi quelques structures de données et variables globales. Ces objets se trouvent au sous-dossier **00\_State**. Parmi cet ensemble, deux blocs-fonctions servent de fondation aux blocs sous-système et module ADS : **FB\_SubSystemBase** et **FB\_AdsDeviceBase**. Les segments suivants décrivent conceptuellement ces deux objets.

#### FB\_SubSystemBase

Chaque bloc-fonction qui hérite de **FB\_SubsystemBase** forme un sous-système. Ce FB déclare les fonctions et variables de conduite de base pour un sous-système : **Coldstart**, **Init**, **Start**, **Stop** et **Reset**. Chaque bloc-fonction qui hérite de cet objet doit implémenter ces méthodes en fonction des modules dont il est responsable. Le bloc système exécute ces fonctions selon l'état de la machine (**FB\_StateMachine**). Ces fonctions peuvent s'interrompre à n'importe quel moment et le sous-système doit gérer adéquatement ces situations (p. ex. lors d'un arrêt d'urgence). Un sous-système a la responsabilité d'appliquer les règles de conduite du système à l'ensemble des modules qu'il supervise.

#### FB\_AdsDeviceBase

**FB\_AdsDeviceBase** est la base de tous les modules ADS (module-client) du projet PLC. Ce bloc combiné aux blocs fonctionnels de service ADS forment l'interface de communication et de contrôle d'un module ADS distant (module-serveur). Actuellement, chaque module-client peut employer quatre types de service : paramètre, commande, requête et événement. Le tableau 4.5 présente ces différents types de service. La flexibilité de cette interface permet de définir un nombre arbitraire de services (p. ex. paramètres, commandes, etc.) pour un module ADS. Chaque FB qui hérite du bloc de base doit définir le type de module qu'il implémente (p. ex. caméra numérique) pour trouver et enregistrer dynamiquement ces blocs de service à son homologue distant. De plus, chaque module ADS définit uniquement

chacun des membres d'une classe de service. Par exemple, chaque FB de paramètre ADS possède un identifiant unique selon le type de paramètre qu'il représente : `paramType1 := 1`, `paramType2 := 2` et ainsi de suite. L'enregistrement des blocs de service du module-client s'effectue lorsque celui-ci est chargé dans le gestionnaire de modules ADS distant par le biais du bloc-fonction système `FB_AdsClient`.

Tableau 4.5 Description des blocs-fonctions de service d'un module ADS

Bloc-fonction	Description
Paramètres ADS ( <code>FB_AdsParameter</code> )	Représente un type de donnée (primitif ou structure de données utilisateur). Il sert d'une certaine manière de pointeur.
Commandes ADS ( <code>FB_AdsCommand</code> )	Représente une fonctionnalité exécutable pouvant prendre des paramètres ADS en entrées et retourner un ou des paramètres ADS en sortie. À la différence d'une requête ADS, une commande peut changer l'état du module. L'ordre d'exécution d'une commande ADS est important et certaines commandes ne peuvent pas s'exécuter simultanément (p. ex. différentes fonctions de déplacements d'un moteur).
Requête ADS ( <code>FB_AdsQuery</code> )	Représente d'une certaine manière une fonction de type <code>GET</code> . Il sert principalement à mettre à jour un paramètre ADS à l'interne du module ADS. À la différence d'une commande ADS, une requête ADS ne modifie pas l'état du module et plusieurs requêtes peuvent s'exécuter simultanément. Par exemple, un module ADS peut exiger sur une base périodique la mise à jour de son état général (statut).
Événement ADS ( <code>FB_AdsEvent</code> )	Représente un événement spécifique d'un module ADS auquel un module client ADS peut s'enregistrer. Lorsque l'événement se déclenche au niveau du module-serveur, celui-ci le signale à son auditeur. Par exemple, un module ADS peut recevoir une notification lorsqu'une variable d'état spécifique change.

### **FB\_AdsClient**

Ce bloc-fonction système réalise la liaison de base entre le programme PLC et l'application de commande de WPC. Il ne suit pas la machine à états du système et est actif dès le tout premier cycle PLC. Dès que le bloc est actif, celui-ci tente d'établir une connexion avec le gestionnaire de modules ADS de l'application Windows. Lorsque la connexion est établie, ce FB s'assure que l'échange avec le serveur est toujours opérationnel, sinon une erreur est propagée à tous les blocs-fonctions ADS. Il s'occupe également de charger les modules-clients ADS (contrôleurs) dans le gestionnaire de modules ADS. Dans le but d'éclaircir les différents concepts de ce mécanisme, le schéma fonctionnel de la figure 4.8 présente l'architecture de la communication ADS entre les unités logiques WPC-PLC. Le tableau 4.6 décrit les principales entités de cette figure.

Simplement, tout le mécanisme d'échange ADS entre les deux systèmes se base sur l'écriture et la lecture d'adresses mémoires (%M\*) et sur le système de notifications ADS. Essentiellement, ces adresses mémoires ont deux rôles distincts :

1. Déclencher une notification ADS qui est reliée à une fonction d'un serveur (gestionnaire ou module-serveur ADS) ;
2. Échanger des données en lecture ou écrire seulement (p. ex. paramètres d'entrée ou de sortie pour une fonction).

TwinCAT définit trois groupes mémoires : 1. %I\* mémoire d'entrées (*input memory area*) ; 2. %Q\* mémoire de sorties (*output memory area*) ; 3. et %M\* mémoire de registres (*flag memory area*). Si le caractère \* est employé, TwinCAT procédera automatiquement à l'adressage des variables mémoires de manière optimisée lors du chargement du programme. L'extension du standard de programmation IEC 61131-3 de TwinCAT permet d'obtenir dynamiquement l'adresse de décalage des variables mémoires (%M\*) en soustrayant l'adresse 0 (%M0) à l'adresse mémoire d'intérêt. En connaissant l'adresse du groupe (*memory group*) et de décalage (*index offset*), il est possible avec le client ADS d'accéder à toutes les variables mémoires définies par le programme PLC, c'est-à-dire de tous les blocs-fonctions d'interface ADS. Par cet échange structuré, les modules-clients ADS réussissent à se lier lors de l'exécution du programme PLC à leurs correspondants distants et commander ceux-ci. Une fois conçus, les contrôleurs ADS s'utilisent comme des blocs standards PLC et utilisent les mêmes conventions que les langages du IEC 61131-3, faisant abstraction de la couche de communication ADS.

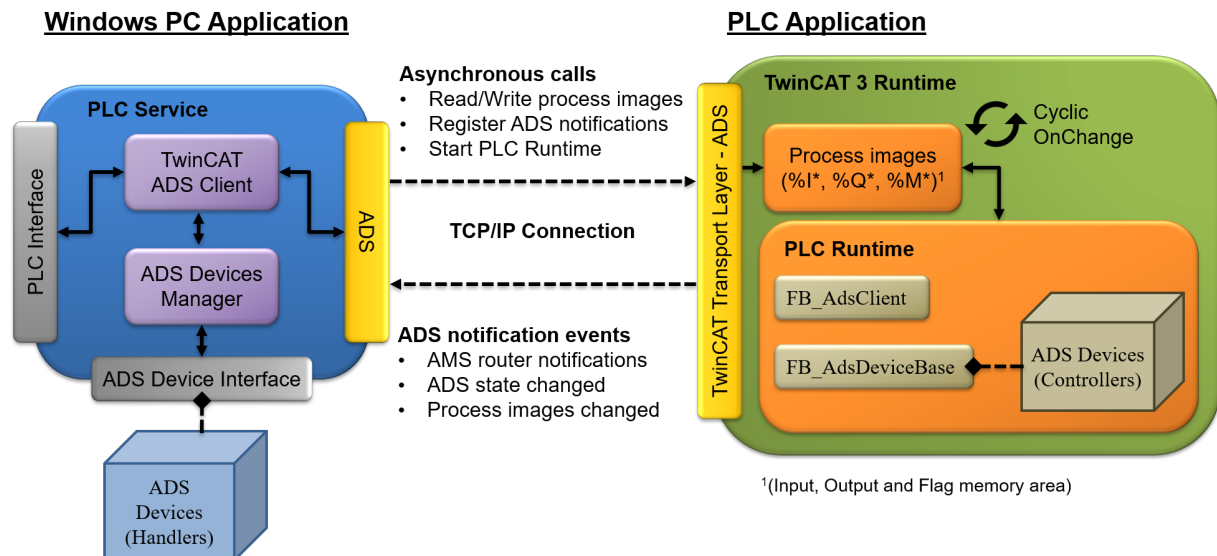


Figure 4.8 Schéma conceptuel du mécanisme d'échange événementiel ADS entre l'application PLC et WPC (en anglais)

Tableau 4.6 Description des différentes entités du mécanisme de communication ADS du Métallographe 3D

Entité	Description
PLC Runtime	– Il représente l'environnement d'exécution et de mémoire ( <i>process images</i> ) de la tâche PLC.
Client ADS TwinCAT	– Il établit la connexion TCP/IP avec le PLC Runtime. – Il réalise les fonctions énumérées à la section E.
Gestionnaire de modules ADS ( <i>ADS device manager</i> )	– Il localise et associe un module-client ADS à un module-serveur selon le type de module ADS. – Il interprète les notifications ADS et les propage aux bons modules. – Il fournit une interface aux modules-serveurs pour lire et écrire sur l'espace mémoire des modules-clients ADS par l'intermédiaire du client ADS. – Il peut créer ou supprimer dynamiquement des notifications ADS.
FB_AdsClient	– Il établit la communication avec le gestionnaire de modules ADS. – Il charge les modules-clients ADS dans le gestionnaire de modules ADS.
Module-serveur ADS ( <i>handler</i> )	– Il possède une valeur d'identification unique. – Il définit et identifie des structures de données (paramètres), commandes et requêtes. – Il se charge d'exécuter les commandes ou requêtes qu'il reçoit. – Il peut envoyer certains événements au client si ce dernier s'est enregistré à ceux-ci.
Module-client ADS ( <i>controller</i> )	– Il s'occupe d'envoyer des commandes ou requêtes à un module ADS spécifique. – Il connaît la structure et les types de paramètres, commandes, requêtes et événements du module qu'il interface.

### Bloc-fonction de sécurité

Le bloc-fonction FB\_Safety a un rôle d'adaptateur entre le programme PLC et l'application du terminal de sécurité (STL). Tous les *Alias Device* des E/S de sécurité et d'états logiques de l'application TwinSAFE sont liés aux variables d'E/S de FB\_Safety. De plus, quelques E/S standards, tels que les verrouilleurs de portes de sécurité (TS-1, TS-2 et TS-3), sont également gérés par ce bloc. Bref, les principales fonctions de ce bloc sont :

1. Le démarrage de l'application de sécurité ;
2. La supervision des erreurs du groupe et FB de sécurité ;
3. La reconnaissance des erreurs du groupe ;
4. L'activation de l'énergie opérationnelle (*Operating power supply*) ;
5. Le verrouillage des portes (mode automatique).

### Bloc-fonction de l'interface visuelle

Le bloc-fonction FB\_Visu a comme unique fonction d'actualiser les variables d'entrées et sorties de l'interface visuelle. Ce bloc hérite de FB\_AdsDeviceBase, il s'agit donc d'un

module-client ADS. Chaque bloc sous-système définit des interfaces de données (DUT) de contrôle (**Control**), d'option (**Option**) et de statut (**Status**). À l'interne, **FB\_Visu** déclare une copie de ces structures comme variable d'E/S sur des adresses mémoire PLC (%M). À l'aide d'une structure de données génériques et le service ADS, ces adresses mémoires sont mises à jour à chaque cycle PLC et lorsqu'une valeur change, un événement est automatiquement acheminé à l'interface graphique PC qui peut alors lire la nouvelle valeur.

## 4.2 Modules PC

L'unité logique Modules PC (UL-MODPC) comprend l'ordinateur (WPC) et l'application de commande Windows. Cette unité répond à plusieurs spécifications fonctionnelles du projet telles que :

- Piloter les composants fonctionnels nécessitant des pilotes et des bibliothèques logicielles spécifiques (p. ex. CAM-1) ;
- Posséder une interface graphique avec plusieurs indicateurs et boutons de commande ;
- Enregistrer et gérer une grande quantité de données (plusieurs gigaoctets).

L'application de commande Windows, intitulée **Metallograph Cockpit**, est une application graphique Windows en langage de programmation C# basé sur le cadriciel Microsoft .NET (*Microsoft .NET Framework*). Le choix d'utiliser ce langage et une application Windows s'explique par plusieurs points :

1. Le C# est un langage optimisé pour des machines Windows ;
2. Il est largement soutenu et possède un vaste répertoire de fonctionnalités ;
3. Le développement est gratuit et rapide ;
4. Il dispose de différentes ressources pour la création d'applications graphiques riches en contenu (WinForms, WPF, etc.) ;
5. Les bibliothèques logicielles des composants opératifs branchés à l'ordinateur s'utilisent facilement avec ce langage ;
6. Beckhoff fournit gratuitement une bibliothèque .NET pour la création de client-serveur ADS, offrant la possibilité de communiquer avec le programme PLC distant.

L'outil de développement Visual Studio 2015 (VS15) a servi à concevoir le **Metallograph Cockpit**. Brièvement, cette application Windows consiste en une unique solution VS15 comprenant plusieurs projets (application console, bibliothèque de classes, etc.). En bref, le **Metallograph Cockpit** se caractérise par les éléments suivants :

- Elle est une application multiprocessus (*multiprocess*) et à plusieurs fils d'exécution (*multithreading*) ;

- Elle possède un mécanisme de messagerie interprocessus ;
- Elle possède un mécanisme d'hébergement de services indépendant ;
- Elle possède une bibliothèque pour la manipulation de fichier Tiff, Excel et de traitement d'images (OpenCV) ;
- Elle possède une interface personnalisée pour la conception de n'importe quels modules PC pour qu'ils soient exploitables depuis le programme PLC (module ADS) ;
- Elle possède une interface de programmation applicative (API) pour l'exécution des commandes définies par le programme PLC ;
- Elle possède une interface graphique structurée et modulaire pour l'ajout et le retrait de commandes de contrôle.

### 4.2.1 Architecture de l'application

Comme montré à la figure 4.1, l'application de commande est un programme composé de plusieurs contextes. Les paragraphes suivants décrivent brièvement ceux-ci.

#### **Données et paramètres métallographiques**

Ce contexte regroupe les modèles et outils pour la manipulation d'images dans un format Tiff. Il offre également plusieurs méthodes d'extraction et de sauvegarde pour différents types de format de données (p. ex. fichier Excel, Tiff, etc.). Celui-ci se présente sous la forme d'une bibliothèque de classes.

#### **Gestion des modules ADS**

Ce contexte regroupe les modèles et la logique pour gérer les différents modules et services de l'ordinateur. À l'interne, il concrétise un client TwinCAT et définit l'interface de module ADS. Ce contexte incarne une bibliothèque logicielle (ou interface de programmation applicative) exploitable dans un programme exécutable (p. ex. une application graphique). Globalement, ce contexte traduit les commandes reçues depuis son interface publique et les transfère au programme PLC, et inversement, il adapte et achemine les commandes et données provenant du PLC aux modules ADS. Ce contexte s'occupe également de démarrer et gérer les différents processus complémentaires et essentiels au programme.

#### **Conduite des modules uEye, Kinesis et Orbit**

Ces trois contextes, réalisés sous la forme de service, définissent les modèles et la logique essentiels pour intégrer et piloter les composants fonctionnels des trois fabricants respectifs. À l'aide de l'infrastructure de messagerie mise en place, le gestionnaire de modules ADS est capable d'envoyer des commandes aux différents modules.

---



### Interface graphique de commande et pilotage

Ce contexte regroupe les modèles et la logique en ce qui concerne l'interface visuelle du **Metallograph Cockpit**. Celui-ci exploite l'API de gestion des modules ADS. En fait, ce contexte correspond à la couche Présentation de l'application Windows.

Concrètement, l'application **Metallograph Cockpit** comprend cinq processus distincts qui s'exécutent en parallèle :

1. Une application graphique Windows (hôte)
2. Un processus de messagerie (client)
3. Un processus Orbit (client)
4. Un processus Kinesis (client)
5. Un processus uEye (client)

L'application hôte prend en charge les services clients (processus), c'est-à-dire qu'elle démarre, arrête et supervise l'état de ceux-ci dès le début de son démarrage. Bref, la figure 4.9 schématise conceptuellement les processus et dépendances du logiciel de commande.

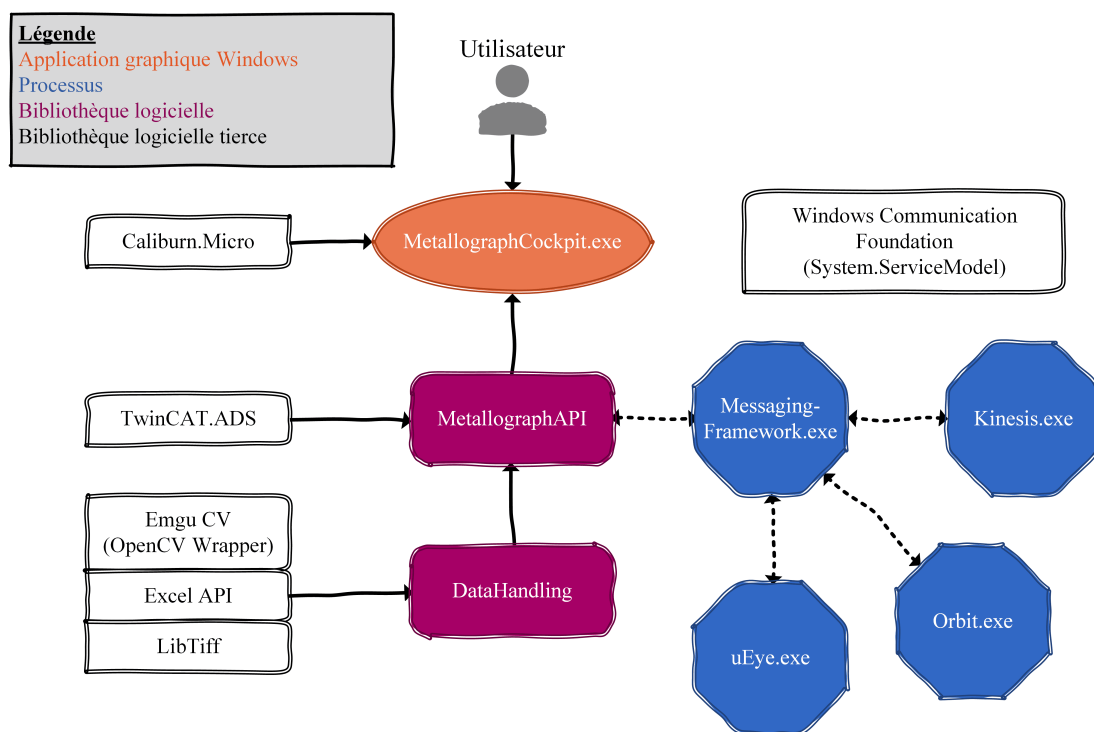


Figure 4.9 Présentation générale de la structure de l'application Windows Metallograph Cockpit

#### 4.2.2 Noyau de l'application

Le projet **MetallographCockpit.Base** incarne l'infrastructure de base de l'application de commande. Ce projet fournit les classes de base ainsi que les modules génériques pour

l'ensemble des projets (contextes) de l'application. Certaines de ces classes concrétisent un concept du pattern tactique décrit dans l'approche DDD (p. ex. *value object*, *entity*, *aggregate*, *repository*, *factory*, etc.) [23]. Les deux plus importants modules de cette infrastructure sont le cadre de messagerie (*Messaging Framework*) et le cadre de processus hébergé (*Hosted Process Framework*). La conception de ces deux composants logiciels maison avait comme objectif d'isoler les différents contextes réduisant ainsi certains problèmes techniques et permettant de tester individuellement les modules.

### Cadre de messagerie (*Messaging framework*)

Le chapitre 11, *Integrating via Messaging*, du livre *Patterns, Principles and Practices of Domain-Driven Design* [23] et les patrons de communication populaires tels que l'éditeur-abonné (*publisher-subscriber*), l'agent de messagerie (*message broker*), etc., ont grandement influencé le choix et la conception du cadre de messagerie du **Metallograph Cockpit**. Au final, le concept retenu est un concept de messagerie centralisée de type éditeur-abonné composé de deux services : un service de publication (**PublisherService**) et un service d'abonnement (**SubscriptionService**). Ces deux services emploient la technologie WCF (*Windows Communication Foundation*) faisant partie du cadre Microsoft .NET (**System.ServiceModel**).

En ce qui concerne l'application Windows, le service de messagerie développé héberge (*self-hosting*) les deux services WCF dans un processus exécutable (**MetallographCockpit.Base.Infrastructure.MessagingService.exe**) pour des raisons de simplicité. Ce processus est pris en charge par l'interface de programmation applicative (**MetallographCockpit.MetallographAPI**) en collaboration avec le cadre de processus hébergé de l'infrastructure, présenté à la section suivante. Les deux services WCF ont accès à une classe commune où les informations concernant les abonnées et les *topics* y sont enregistrées. Un *topic* représente le type de message et consiste du nom complet de la classe de message (*fully qualified name*), donnant une signature unique à chaque message. Le tableau 4.7 résume les caractéristiques principales des services WCF du cadre de messagerie.

Tableau 4.7 Spécifications des services WCF du cadre de messagerie

	Service de publication	Service d'abonnement
<b>Protocole de transport</b>	<i>Named Piped</i>	<i>Named Piped</i>
<b>Méthode de sérialisation</b>	<i>Xml String Serializer</i>	<i>Xml String Serializer</i>
<b>Méthode d'hébergement</b>	Auto-hébergé	Auto-hébergé
<b>Instance Context Mode</b>	Par appel	Par session

Afin de simplifier l'utilisation du cadre de messagerie, la bibliothèque **MetallographCockpit.Base** offre quelques classes de base permettant de créer simplement et rapide-

ment des classes de type *publisher* ou *subscriber*. Une fois le service de messagerie hébergé et démarré par le processus hôte, toutes les classes peuvent exploiter le service. L'échange des messages s'effectue de manière asynchrone et est interprocessus. Pour des raisons de protection et d'intégrité, la communication est exclusivement possible à l'interne de l'application de commande et entre les processus hébergés par l'infrastructure. Par exemple, le service n'autorise pas que des clients WCF tiers publient ou s'abonnent au service. Somme toute, la figure 4.10 illustre conceptuellement le cadre de messagerie du **Metallograph Cockpit**.

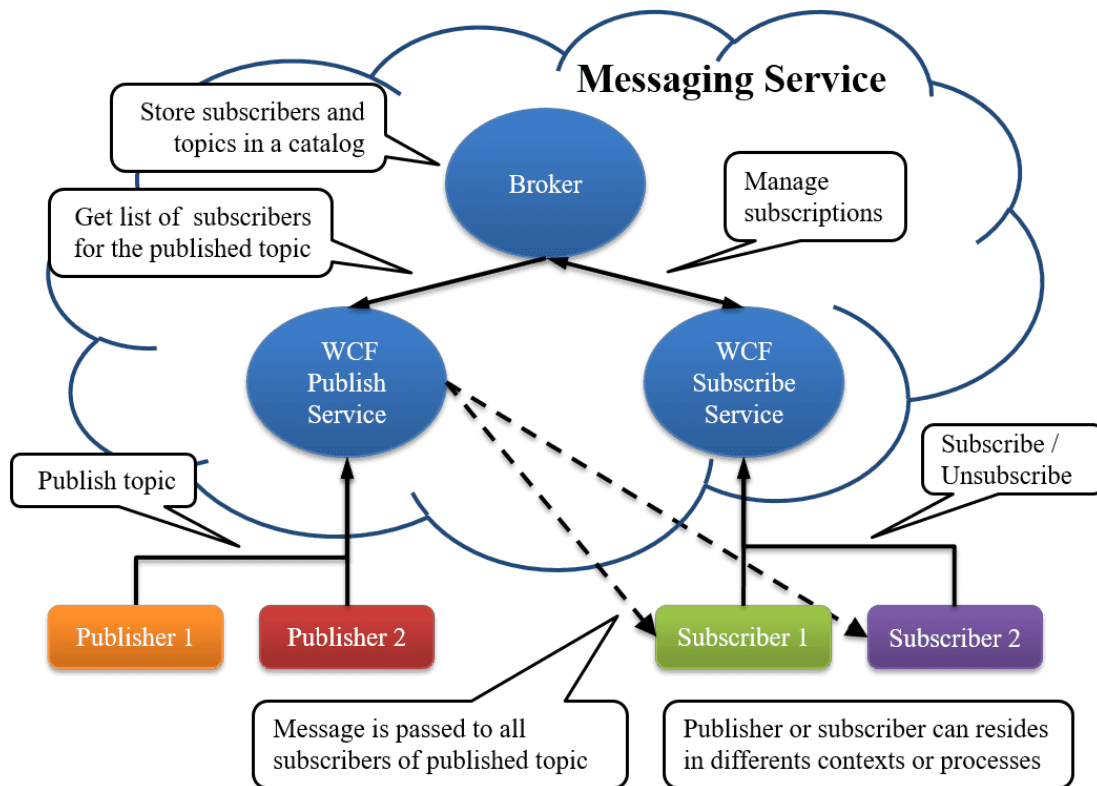


Figure 4.10 Schématisation du concept du cadre de messagerie du **Metallograph Cockpit** (en anglais)

### Cadre de processus hébergé (*Hosted Process Framework*)

L'objectif derrière la conception du cadre de processus hébergé était de fournir un outil simple à l'application hôte de gérer l'ensemble des processus exécutables. Puisque les services des périphériques branchés au PC sont isolés de l'API principale, cette dernière avait besoin d'un moyen pour démarrer et superviser ces services. Cette infrastructure, accessible depuis la bibliothèque `MetallographCockpit.Base`, se base sur la classe native `Process` de Microsoft .NET et sur une simple communication interprocessus maison. À l'aide de cet outil, le programme est capable d'exécuter des processus localement si ces derniers adaptent la classe de base (`HostedProcess`) fournie par le cadriciel.

Simplement, un processus exécutable s'enregistre en tant qu'hôte auprès de l'infrastructure. Ensuite, le processus maître (hôte) peut alors démarrer autant de `HostedProcess` que souhaité. Un mécanisme de protection permet l'enregistrement d'un unique hôte par système. De plus, une seule instance de chaque processus hébergé est possible, c'est-à-dire qu'il est impossible d'avoir deux processus identiques (p. ex. `MessagingService.exe`) qui fonctionnent en même temps.

### 4.2.3 Manipulation des données métallographiques

À la base, les données métallographiques consistent en des images de la caméra numérique (CAM-1), des mesures et positions du palpeur numérique (Z-PROBE), et de la position angulaire des filtres polariseurs (SMRM-1/-2). Ces composants fonctionnels sont commandés par des services du `Metallograph Cockpit`. Puisque l'application Windows enregistre les principales données d'acquisition, il était plus simple de créer une bibliothèque de classes (`MetallographCockpit.DataHandling`) pour gérer ces données. Or, pour des raisons de simplicité et de temps de développement limité, cette bibliothèque ne suit pas les principes du DDD et celle-ci dépend de quelques bibliothèques logicielles externes. Le tableau 4.8 donne un aperçu de ces dépendances. Toutes ces bibliothèques sont accessibles à partir de NuGet de Visual Studio à l'exception de `Microsoft.Office.Interop.Excel` qui est disponible dans la liste de bibliothèques .NET si une suite de Microsoft Office est installée sur la machine Windows.

Tableau 4.8 Description des bibliothèques logicielles externes utilisées pour la manipulation de données dans `Metallograph Cockpit`

Bibliothèque externe	Description
<code>Emgu.CV</code>	Interface logicielle .NET enveloppant les fonctionnalités de OpenCV pour la manipulation et traitement d'images.
<code>BitMiracle.LibTiff</code> <code>.NET40</code>	Interface logicielle .NET enveloppant les fonctionnalités de LibTiff pour la manipulation d'images de format TIFF.
<code>Microsoft.Office</code> <code>.Interop.Excel</code>	Interface logicielle .NET pour la manipulation de fichier Microsoft Excel.

Pour l'enregistrement et la manipulation de données de métallographie, le `Metallograph Cockpit` utilise le format de fichier TIFF (*Tagged Image File Format*) principalement pour les raisons suivantes :

- Il permet de conserver les données brutes d'une image matricielle (*raster bytes image*) sans perte d'informations, ce qui est idéal pour un post-traitement ;
- Il permet d'enregistrer des métadonnées personnalisées avec le contenu de l'image ;
- Il permet de faire des piles d'images (*multipaged*) dans un même fichier TIFF ;

- Il est compatible avec la plupart des visionneuses d’images et est libre de droits (*open source*).

Malgré les avantages que ce format de fichier possède, le format TIFF comporte quelques inconvénients. D’abord, les fichiers TIFF utilisent un adressage mémoire basé sur 32-bits, ce qui limite la taille maximale d’un fichier à environ quatre gigaoctets (4 Go), approximativement une pile d’environ 70 images. Un autre aspect limitatif de ce type de fichier est que celui-ci accepte seulement une profondeur de couleur de 8-bits ou 16-bits. À titre indicatif, la caméra du sous-système de caractérisation a une résolution de 12-bits par canal de couleur.

L’acquisition d’images avec une résolution de 12-bits demande un effort supplémentaire au niveau de la manipulation des images à tous les niveaux du programme (sauvegarde, visualisation, allocation de mémoire, traitement, etc.), car celles-ci se traitent généralement sur une base de 16-bits. Les outils logiciels employés n’offrent pas de fonctionnalités clé en main pour ignorer les 4 bits les moins significatifs. Or, à défaut de perdre une précision au niveau des couleurs, la réflexion a conclu d’effectuer une acquisition d’images en couleur avec une résolution de 8-bits.

Finalement, lors de l’acquisition, l’application Windows ajoute à chaque capture d’image les paramètres essentiels pour le post-traitement sous la forme de métadonnées. De plus, pour chaque avance d’échantillon et pour un même ensemble de paramètres, le programme empile les images dans le même fichier, ce qui forme naturellement une pile d’images. De cette manière, le système est capable de produire différentes piles d’images avec différents assortiments de paramètres d’acquisition. Enfin, les tableaux 4.9 et 4.10 résument les métadonnées qui sont incluses à chaque image par le système lors d’une caractérisation de surface. Bref, cet ensemble de données forme les données métallographiques du Métallographe 3D.

Tableau 4.9 Résumé des principales propriétés TIFF de base utilisées pour l’enregistrement d’images (en anglais) [51]

<i>Code</i>	<i>Tag name</i>	<i>Description</i>	<i>Note</i>
256	<i>ImageWidth</i>	<i>The number of columns in the image, i.e., the number of pixels per row.</i>	<i>Width = 2448 pixels.</i>
257	<i>ImageLength</i>	<i>The number of rows of pixels in the image.</i>	<i>Height = 2048 pixels.</i>
258	<i>BitsPerSample</i>	<i>Number of bits per component.</i>	<i>BitsPerSample = 8 (8-bits resolution).</i>
259	<i>Compression</i>	<i>Compression scheme used on the image data.</i>	<i>1 = No compression.</i>
262	<i>Photometric-Interpretation</i>	<i>The color space of the image data.</i>	<i>2 = RGB.</i>

⋮

---

⋮

<i>Code</i>	<i>Tag name</i>	<i>Description</i>	<i>Note</i>
266	<i>FillOrder</i>	<i>The logical order of bits within a byte.</i>	<i>1 = pixels with lower column values are stored in the higher-order bits of the byte (MSB).</i>
274	<i>Orientation</i>	<i>The orientation of the image with respect to the rows and columns.</i>	<i>1 = TOPLEFT.</i>
277	<i>SamplesPer-Pixel</i>	<i>The number of components per pixel.</i>	<i>SamplesPerPixel = 3 for RGB images.</i>
284	<i>Planar-Configuration</i>	<i>How the components of each pixel are stored.</i>	<i>1 = Chunky format.</i>

---

Tableau 4.10 Résumé des principales propriétés TIFF personnalisées utilisées pour l'enregistrement de métadonnées dans les images (en anglais) (Long : 32-bits non-signés ; Double : point flottant IEEE de 64-bits)

<i>Code</i>	<i>Tag name</i>	<i>Type</i>	<i>Count</i>	<i>Description</i>
667	<i>SampleId</i>	<i>Long</i>	<i>1</i>	<i>Sample Id of the configured session parameter set.</i>
668	<i>StackId</i>	<i>Long</i>	<i>1</i>	<i>Stack Id of the configured session parameter set.</i>
669	<i>PolarizerAngle</i>	<i>Double</i>	<i>1</i>	<i>Absolute position angle of polarizer filter (°).</i>
670	<i>AnalyzerAngle</i>	<i>Double</i>	<i>1</i>	<i>Absolute position angle of analyzer filter (°).</i>
671	<i>ZProbeValue</i>	<i>Double</i>	<i>1</i>	<i>Resulting probing acquisition value (mm).</i>
672	<i>SamplePosition</i>	<i>Double</i>	<i>3</i>	<i>X, Y, Z microscope axis absolute position of image acquisition (mm).</i>
673	<i>ProbingPosition</i>	<i>Double</i>	<i>3</i>	<i>X, Y, Z microscope axis absolute position of probing acquisition (mm).</i>

---

#### 4.2.4 Interface de programmation (API)

La bibliothèque de classes `MetallographCockpit.MetallographAPI` constitue le cœur logique de l'application `Metallograph Cockpit`. Cette bibliothèque fournit une classe intitulée `Metallograph` qui comprend plusieurs objets ayant un rôle spécifique. En résumé, l'API offre à un utilisateur (ou un programme) une série de fonctionnalités comme :

- Se connecter au programme PLC ;
  - Exécuter des séquences automatisées du programme PLC ;
  - Opérer manuellement et de manière individuelle l'équipement opératif ;
  - Opérer manuellement un groupe d'équipements ou un sous-système ;
  - Superviser l'état des opérations et des composants fonctionnels ;
  - Gérer des sessions et paramètres de métallographie ;
  - Etc.
-

Une seule et unique instance de la classe **Metallograph** est possible et celle-ci doit être configurée dans l'application qui souhaite exploiter l'API telle que l'application graphique du **Metallograph Cockpit** (**MetallographCockpit.Presentation**). La figure 4.11 schématise conceptuellement les objets qui forment cette classe, alors que le tableau 4.11 décrit chacune de ces composantes.

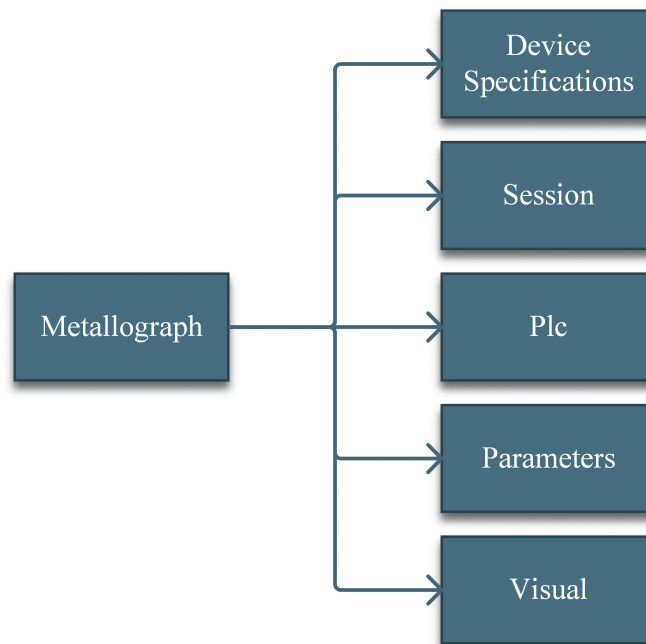


Figure 4.11 Composition de la classe principale **Metallograph** de l'interface de programmation applicative

Tableau 4.11 Description des objets de la classe **Metallograph**

Objet	Description
DeviceSpecifications	Objet permettant d'accéder à la configuration des composants connectés au WPC.
Plc	Objet offrant une interface pouvant gérer la connectivité, le démarrage, la configuration et la communication des modules ADS du programme PLC.
Session	Objet gérant les sessions de métallographie comme la création, la modification, le chargement et la sauvegarde de celles-ci.
Parameters	Objet gérant les paramètres de métallographie comme la création, le chargement et la sauvegarde de ceux-ci.
Visual	Objet offrant une interface de commandes génériques pour un échange cohérent entre l'ordinateur de commande et l'ordinateur embarqué.

### Interface de communication PLC

À l'interne, l'API construit un client TwinCAT ADS et expose certaines fonctionnalités par l'intermédiaire de l'objet **Plc**. Cet objet joue le rôle de client et serveur ADS. D'abord, en tant que client, il sert à établir la connexion entre le programme WPC et PLC et à

créer les notifications d'enregistrement. Ensuite, une fois la connexion et la séquence d'enregistrement terminées, le gestionnaire de modules ADS réalise la fonction de serveur pour les modules-clients ADS du PLC. L'échange d'information se base principalement sur le mécanisme de notifications ADS discuté à la section 4.1.5. À l'heure actuelle, le gestionnaire conduit huit modules ADS (*workers*). Le tableau 4.12 décrit brièvement chacun de ces modules.

Tableau 4.12 Présentation des modules ADS du **Metallograph Cockpit**

Module ADS	Classe	Description
Filtre analyseur Thorlabs	FB_CageRotator	Module pour le contrôle du filtre analyseur du microscope (MSRM-1).
Filtre polariseur Thorlabs	FB_CageRotator	Module pour le contrôle du filtre polarisant du microscope (MSRM-2).
Serveur Orbit	FB_OrbitServer	Module pour le contrôle du serveur Orbit.
Palpeur axe Z	FB_OrbitDigitalProbe	Module pour le contrôle du réseau et du palpeur numérique Orbit (Z-PROBE).
Caméra	FB_uEyeCamera	Module pour le contrôle de la caméra numérique uEye du microscope (CAM-1).
Synchroniseur d'horloge	FB_TimeSync	Module pour la synchronisation des temps entre le programme PLC et le <b>Metallograph Cockpit</b> .
Gestionnaire de métallographie	FB_Metallography Manager	Module gérant les sessions et paramètres de métallographie ainsi que l'enregistrement des données métallographiques lors de l'acquisition.
Interface visuelle d'opération	FB_Visu	Module servant d'interface pour l'échange de commandes et d'informations le programme PLC et WPC.

### Séance de métallographie

La phase d'élaboration et d'organisation de l'API a débouché à un concept de séance métallographique. Par définition, une séance de métallographie représente l'ensemble des opérations qu'un opérateur effectue pour analyser ou caractériser un échantillon avec le Métallographe 3D. Ce concept repose principalement sur la combinaison de trois éléments : une session ; des paramètres ; et un gestionnaire de métallographie. Brièvement, pour pratiquer une séance de métallographie, l'utilisateur a l'obligation de créer ou de charger une session de métallographie afin de configurer les paramètres nécessaires pour exécuter des séquences automatisées telles que le polissage, la manipulation, l'acquisition, etc.

### Session de métallographie

D'abord, le système métallographique doit connaître l'emplacement physique d'entreposage des données. Donc, durant la phase de création d'une session, l'application invite l'utilisateur à lui fournir minimalement les informations suivantes :

- Chemin du répertoire de travail (*Working directory path*) ;
- Nom de la session (*Session name*) ;



- Nom de l'échantillon à analyser (*Sample name*);
- Nom de l'utilisateur (*User name*).

Une fois la session créée, le **Metallograph Cockpit** génère automatiquement un répertoire de travail avec le nom de la session ainsi que quelques dossiers et fichiers. La figure 4.12 donne un aperçu d'un répertoire typique généré par le programme ayant comme nom de session *SessionName*. En principe, une session de métallographie suit les consignes suivantes :

- Une seule et unique session est active et chargée dans l'API;
- Une session est immuable une fois créée;
- Un fichier de paramètres métallographiques par défaut est créé (**Metallography Parameters.xml**).

Pour ajouter, les informations fournies lors de la création d'une session servent également à nommer automatiquement les fichiers de données lors d'une séquence d'acquisition en mode manuel ou automatique. L'objet **Session** de l'API encapsule toutes les fonctions nécessaires pour la gestion d'une session de métallographie.

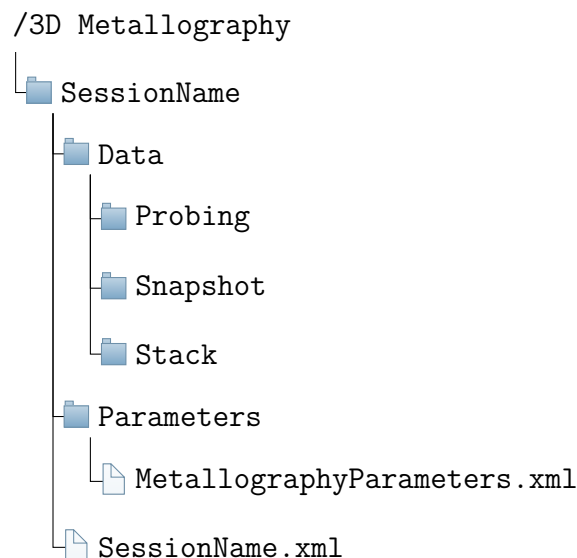


Figure 4.12 Schématisation de l'arborescence du répertoire de travail d'une session de métallographie nouvellement créée

### Gestionnaire de métallographie

Omniprésent à l'utilisateur, le gestionnaire de métallographie a un rôle important au sein de l'API. Ce dernier s'occupe entre autres de valider, de sauvegarder et d'envoyer de manière cohérente les paramètres de métallographie au programme PLC lorsque requis. Afin d'éviter toute ambiguïté entre les informations de l'API et du programme PLC, la modélisation de cet objet a entraîné l'élaboration d'un mécanisme de verrouillage de session.

Avant d'exécuter toute fonction du Métallographe 3D nécessitant un paramètre, l'utilisateur doit verrouiller la session présentement chargée dans l'application de commande. Une fois la session verrouillée, les paramètres sont alors immuables et le programme PLC s'occupe de télécharger ceux-ci. Étant impossible d'accéder directement à des listes ou matrices de données dynamiques (tailles variables) avec ADS, le programme PLC doit effectuer des requêtes d'accès au module PC pour accéder aux paramètres dont il a besoin tels les paramètres d'acquisition lors d'une séquence d'acquisition par exemple.

### Paramètres de métallographie

Pour effectuer certaines séquences automatisées, le Métallographe 3D a besoin de quelques paramètres spécifiques. À cette fin, le **Metallograph Cockpit** propose une structure de données « sérialisable » et modulaire. Les figures 4.13 et 4.14 présentent la composition logique de ces paramètres. Le chargement et la sauvegarde de ces données pour une session se font par l'intermédiaire de l'objet **Parameters** de la classe **Metallograph**. Actuellement, l'API n'offre pas la possibilité de modifier les paramètres depuis le programme ou à partir de l'interface graphique. Cependant, une fois généré, il est possible de modifier manuellement le fichier de paramètre et de le recharger dans l'application. Pour cela, il faut s'assurer de bien respecter la structure et la nomenclature du fichier XML (non expliquées dans ce mémoire). La figure H.9 en annexe montre un exemple de fichier de paramètres métallographiques.

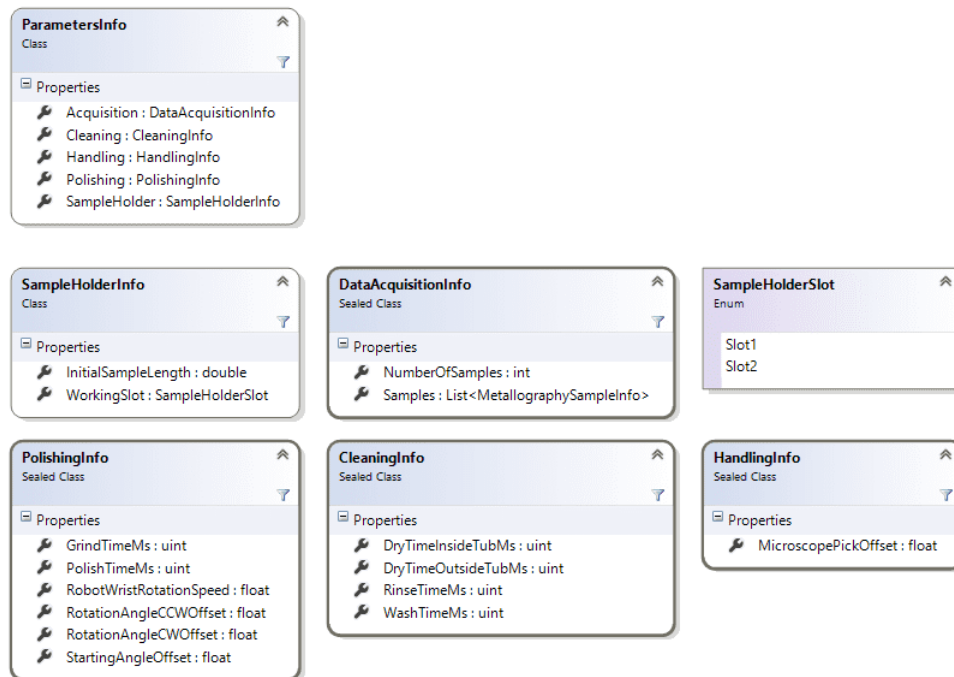


Figure 4.13 Présentation de la structure des paramètres métallographiques (1 de 2)

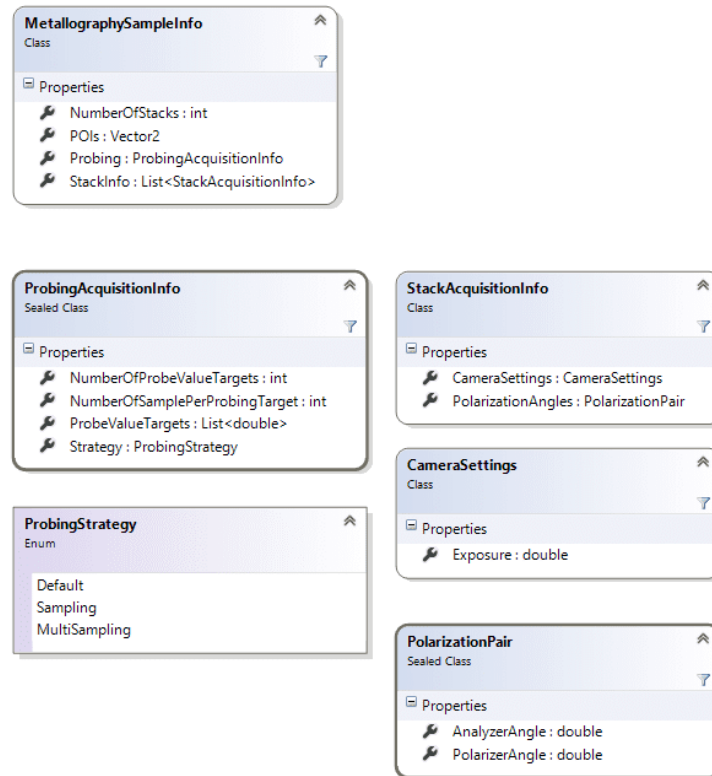


Figure 4.14 Présentation de la structure des paramètres métallographiques (2 de 2)

### Interface utilisateur

En dernier point, l'objet **Metallograph** de l'API fournit des interfaces utilisateurs (*user interface* ou UI) via l'objet **Visual**. Chacun des éléments du système, soit les modules, les sous-systèmes et le système possède son propre UI. Chaque interface se distingue par un identifiant unique (**Uid**) et comprend trois sous-interfaces : une de contrôle (**Control**) ; une d'option (**Option**) ; et une de statut (**Status**). Le tableau 4.13 décrit brièvement le rôle de chacune de ces sous-interfaces. L'objet **Visual** fournit également des méthodes génériques basées sur les **Uid** afin d'écrire ou de lire sur l'espace mémoire visuel du programme PLC, plus spécifiquement sur les variables mémoire du bloc-fonction **FB\_Visual**. La tâche PLC détermine les **Uid** des UI lors de son premier cycle d'exécution. Donc, l'accès aux données d'image visuelles est possible seulement lorsque le **Metallograph Cockpit** s'est connectée au programme PLC et que le module **ADS FB\_Visual** a complété son enregistrement.

L'objet **Visual** fournit un graphe visuel (représentation structurelle des UI) afin d'obtenir le **Uid** d'un module spécifique du système ou d'un sous-système au cours de l'exécution. La figure 4.15 schématise la composition logique du graphe visuel **MetallographUiGraph** de l'API. Celui-ci se rapproche de très près de la décomposition structurelle du Métallographe 3D présentée au chapitre 3.

Tableau 4.13 Description des sous-interfaces d'une interface utilisateur de base

Sous-interface	Droit d'accès	Description
Control	Lecture / Écriture	Regroupe les commandes (fonctions) du module
Option	Lecture / Écriture	Regroupe les paramètres du module
Status	Lecture	Regroupe les informations d'état du module

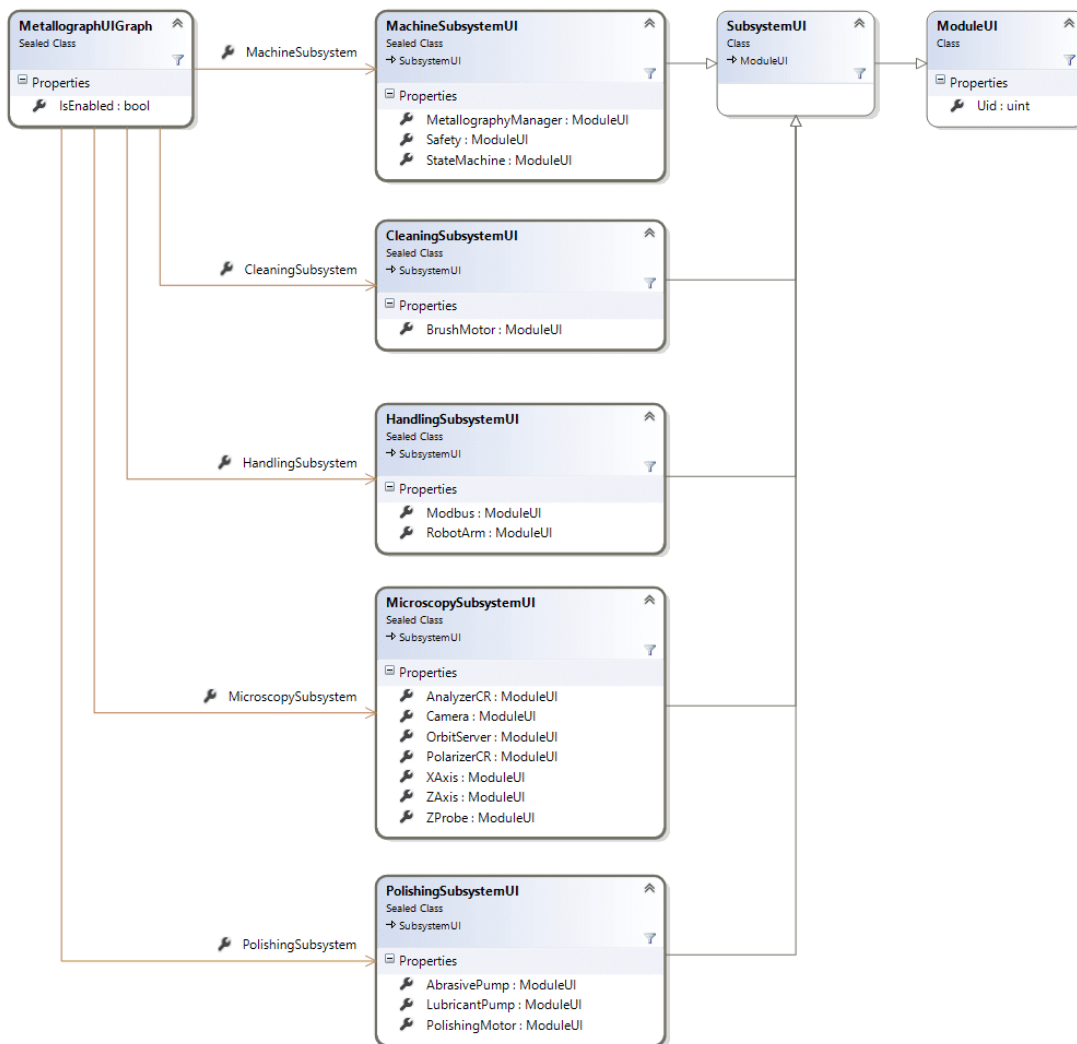


Figure 4.15 Présentation de la structure du graphe visuel de l'API (MetallographUiGraph)

### 4.2.5 Couche présentation (IHM-PC)

Finalement, la dernière composante de l'application Windows consiste en la couche de présentation, c'est-à-dire l'IHM de commandement du Métallographe 3D (IHM-PC) matérialisée dans le projet `MetallographCockpit.Presentation`. Cette couche applicative est le point d'entrée du `Metallograph Cockpit`. Simplement, celle-ci exploite et expose visuellement les informations et fonctions de l'API (`Metallograph`). Le projet correspond à la couche de présentation.

Concrètement, cette IHM est une application graphique WPF (*Windows Presentation Foundation*). La composante WPF fait partie du cadre .NET de Microsoft et est pré-installée sur toutes les machines Windows depuis la version Windows Vista. Le développement de l'application graphique adapte une architecture MVVM (*Model-View-ViewModel*) et un principe de conception de séparation des préoccupations (*separation of concerns*). Pour appliquer ces principes, la couche de présentation utilise comme fondation les bibliothèques logicielles `Caliburn.Micro` et `Unity Container` (disponible depuis NuGet de VS15). Sans entrer dans les détails techniques, la popularité et le corps solide en matière de logiques visuelles et d'isolation de ces bibliothèques ont grandement contribué à leur sélection. De plus, ces outils ont permis de développer l'application graphique de telle sorte qu'il est facile de créer et d'intégrer de nouveaux éléments visuels, simples ou complexes, rapidement.

## 4.3 Manipulations robotisées

Le dernier sous-domaine logique de contrôle programmé du Métallographe 3D englobe l'ensemble des tâches et programmes exécutables du contrôleur FANUC (RJ3-CTRL) et de son logiciel `HandlingPro V5.30-2`. Ces programmes et le contrôleur forment l'unité logique manipulations robotisées (UL-ROBOT). Ces composants logiciels personnalisés donnent l'habileté au programme PLC, par le biais d'une interface de communication, d'exécuter des programmes de manipulation robot et d'avoir un pouvoir décisionnel sur la conduite logique de ces séquences.

Le système FANUC est à l'origine d'un généreux don au projet initial. Cependant, même si ce don a considérablement réduit les coûts du projet, ce système offre un nombre restreint d'options et est une technologie vieillissante (système datant de 2001). Par conséquent, le choix d'une technologie de communication compatible, à faible coût, entre le système robot et PLC, était très limité. Toutefois, un précédent stage en lien avec ce projet avait proposé et développé un programme sur le contrôleur robot adaptant un serveur Modbus. À cet effet, le projet précurseur a spécialement acheté une licence logicielle pour la fonc-

---

tionnalité TF6250 TC3 (*TwinCAT Modbus TCP Server*) pour le PLC afin de réaliser un client Modbus. En plus de cette partie, la conception de programmes de manipulations et tâches exécutives a permis de concrétiser les séquences automatisées impliquant le bras manipulateur et la pince pneumatique. Ce chapitre a pour but de présenter les principaux constituants de cette unité logique.

### 4.3.1 Architecture de la logique de contrôle

La logique de contrôle du bras manipulateur comprend un ensemble de fichiers sources et de programmes compilés, chargés dans la mémoire du contrôleur R-J3. Ces fichiers représentent les programmes utilisateurs développés spécifiquement pour le Métallographe 3D. Les langages de programmation du système robot sont le KAREL et le TP, c'est-à-dire les langages propriétaires de FANUC.

Les programmes développés pour l'unité robot se classent dans l'une des trois catégories suivantes : tâche, manipulation ou utilitaire. Le tableau 4.14 décrit ces trois types de classe alors que les tableaux 4.15 et 4.16 présentent l'ensemble des programmes KAREL et TP qui ont servi à réaliser la conduite et les séquences de cette unité. Globalement, la logique de contrôle est gouvernée par les trois principales tâches KAREL : **MAIN**, **MBSVR** et **ROBOT**.

D'abord, la tâche principale **MAIN** réalise une machine à états, une inspiration simplifiée de celle de la tâche PLC, qui dicte l'ordre logique des opérations du système robot. Ensuite, la tâche **MBSVR** réalise le serveur Modbus et sert d'interface de communication avec le programme PLC. Ce serveur adapte quelques fonctions de base du protocole Modbus qui interagissent sur des plages d'adresses mémoires prédéfinies. Le serveur associe ces adresses à des E/S et registres mémoires du contrôleur robot. Les tâches **MAIN** et **ROBOT** inspectent en temps réel la valeur de ces différentes E/S et détectent les changements logiques. Enfin, la tâche **ROBOT** s'occupe exclusivement d'exécuter un programme de manipulation (*robot jobs*) préalablement sélectionné par le client Modbus (programme PLC). Bref, la figure 4.16 schématise globalement l'architecture logique du système robotisé.

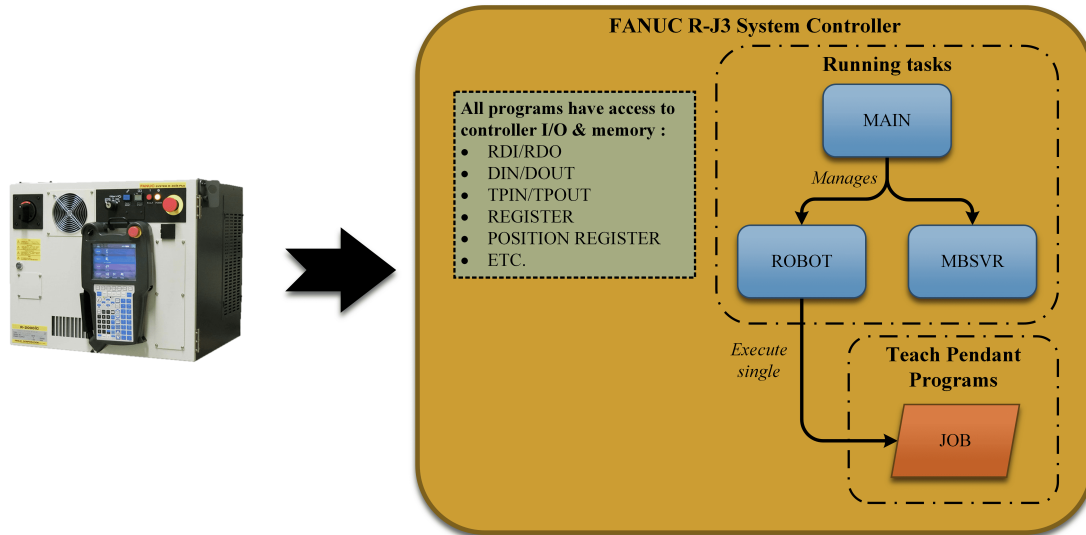


Figure 4.16 Présentation générale de la logique de contrôle du système de manipulations robotisées (en anglais)

Tableau 4.14 Description des différentes classes de programme de l'application robot

Classe	Description
Tâche	Est un programme qui s'exécute en continu une fois démarré et celui-ci partage des périodes de temps du CPU avec les autres tâches et programmes courants selon une priorité prédéfinie.
Manipulation	Est un programme TP qui réalise un déplacement du bras manipulateur. Il peut également effectuer des opérations sur les E/S physiques comme modifier l'état d'une sortie numérique ou lire/écrire sur des registres mémoires.
Utilitaire	Est tout autre programme n'étant pas une tâche ou une manipulation robot. Sous la forme d'une bibliothèque logicielle ou d'un programme utilitaire, il sert notamment à organiser des routines et à rendre les programmes principaux plus lisibles.

Tableau 4.15 Description des programmes KAREL (.PC) de l'application robot

Nom	Type	Description
MAIN	Tâche	Tâche principale appliquant la conduite logique de la machine à états du système robot. Cette tâche s'occupe de démarrer et superviser le bon déroulement des sous-tâches MBSVR et ROBOT. Cette tâche démarre automatiquement lorsque le contrôleur FANUC est sous-tension et qu'il a terminé sa séquence de démarrage.
MBSVR	Tâche	Tâche ayant comme rôle de serveur Modbus. Celle-ci reçoit et exécute les commandes exigées par un client Modbus (c.-à-d. le programme PLC).
ROBOT	Tâche	Tâche ayant comme rôle de lancer les programmes de manipulation robot. Cette tâche est active et fonctionnelle uniquement lorsque l'état du programme MAIN est <b>Started</b> (voir chapitre 4.3.2). Tant que la tâche MAIN ne démarre pas celle-ci, il est impossible d'exécuter un programme de manipulation ou de déplacer le bras manipulateur. De plus, à la moindre alarme système du contrôleur FANUC, autre qu'un avertissement ( <i>warning</i> ), la tâche ROBOT se termine et tout programme TP est avorté promptement.

Tableau 4.16 Description des programmes TP (.TP) de l'application robot

Nom	Type	Description
H_CLEAN	Manipulation	Déplace le bras manipulateur à sa position de départ ( <i>home</i> ) devant la station de nettoyage.
H_MICRO	Manipulation	Déplace le bras manipulateur à sa position de départ ( <i>home</i> ) devant la station de microscopie.
H_POLI	Manipulation	Déplace le bras manipulateur à sa position de départ ( <i>home</i> ) devant la station de polissage.
J_CLOSE	Manipulation	Active le cylindre pneumatique du robot (SV-4) pour fermer la pince pneumatique.
J_OPEN	Manipulation	Active le cylindre pneumatique du robot (SV-4) pour ouvrir la pince pneumatique.
J_GRIP	Manipulation	Ferme la pince pneumatique et vérifie que le porte-échantillon est bien agrippé.
J_UNGRIP	Manipulation	Ouvre la pince pneumatique et vérifie que le porte-échantillon est bien relâché.
J_PICK	Manipulation	Effectue l'opération de préhension du porte-échantillon à la station de microscopie (présenté à l'annexe F.4).
J_PLACE	Manipulation	Effectue l'opération de placement du porte-échantillon à la station de microscopie (présenté à l'annexe F.4).
J_POLISH	Manipulation	Effectue les manipulations lors du polissage de l'échantillon (présenté à l'annexe F.4).
J_POLROT	Manipulation	Sous-programme qui effectue la rotation du poignet robot lors du polissage. Il est exécuté par J_POLISH.
J_RINSE	Manipulation	Programme qui effectue les manipulations lors du rinçage et séchage de l'échantillon à la station de nettoyage (présenté à l'annexe F.4).
P_FULL	Utilitaire	Change le paramètre de charge utile ( <i>payload</i> ) du robot à plein, c.-à-d. lorsque la pince pneumatique agrippe le porte-échantillon.
P_EMPTY	Utilitaire	Change le paramètre de charge utile ( <i>payload</i> ) du robot à vide, c.-à-d. lorsque la pince pneumatique n'a pas le porte-échantillon.
UF_CLEAN	Utilitaire	Change le repère utilisateur actuel pour celui de la station de nettoyage.
UF_MICRO	Utilitaire	Change le repère utilisateur actuel pour celui de la station de caractérisation.
UF_POLI	Utilitaire	Change le repère utilisateur actuel pour celui de la station de polissage.
UF_WORLD	Utilitaire	Change le repère utilisateur actuel pour le référentiel monde <i>world</i> , soit celui au centre du bras robot.
UT_EEOAT	Utilitaire	Change le repère outil actuel pour le TCP ( <i>tool center point</i> ) robot sans outil ( <i>Empty End of Arm Tooling</i> ).
UT_TCP	Utilitaire	Change le repère outil actuel pour celui du centre de la pince pneumatique lorsqu'elle est complètement étendue (non comprimée).
W_CLOSE	Utilitaire	Attend que le signal de la pince fermée soit à <b>true</b> . Retourne une alarme si le temps d'attente est dépassé.
W_GRIP	Utilitaire	Attend que le signal du porte-échantillon agrippé soit à <b>true</b> . Retourne une alarme si le temps d'attente est dépassé.
W_OPEN	Utilitaire	Attend que le signal de la pince ouverte soit à <b>true</b> . Retourne une alarme si le temps d'attente est dépassé.

⋮



⋮

Nom	Type	Description
W_READY	Utilitaire	Attend que le signal du programme principal prêt soit à <code>true</code> . Retourne une alarme si le temps d'attente est dépassé.

*Fin du tableau*

### 4.3.2 Machine à états

Comme mentionné, la tâche **MAIN** est l'unité responsable de la logique de coordination du bras manipulateur. Celle-ci réalise la machine à états logique telle que schématisée à la figure 4.17. Le tableau 4.17 décrit les différentes conditions de transition de cette machine de conduite. En plus d'avoir le rôle de coordinateur, le programme **MAIN** réalise d'autres activités importantes se résumant à :

1. Gérer la mise en route du contrôleur FANUC ;
2. Gérer le démarrage et l'arrêt des tâches **MBSVR** et **ROBOT** ;
3. Gérer les erreurs système et utilisateur ;
4. Gérer les modes d'opération du contrôleur FANUC (T1, T2 et Auto) ;
5. Gérer les signaux de changement d'état (voir 4.3.3).

Tableau 4.17 Conditions de transition de la machine à états de la tâche **MAIN**

De l'état	À l'état	Conditions de transition
Aborting	Aborted	<ul style="list-style-type: none"> <li>– L'énergie des servomoteurs du bras robotisé est coupée ET</li> <li>– Tout programme de déplacement (TP) ainsi que la tâche robot sont avortés</li> </ul>
Resetting	Stopped	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les erreurs (alarmes) FANUC sont reconnues et effacées ET</li> <li>– Les servomoteurs sont activés et alimentés</li> </ul>
Starting	Started	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Les paramètres d'exécution sont ré-initialisées ET</li> <li>– La tâche <b>ROBOT</b> est démarrée</li> </ul>
Stopping	Stopped	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Tous les programmes de déplacement robot sont terminés ET</li> <li>– La tâche robot est normalement terminée</li> </ul>
Aborted	Resetting	– La détection du front montant du signal <b>RESET</b> <sup>1</sup>
Stopped	Starting	– La détection du front montant du signal <b>START</b> <sup>1</sup>
Starting Started	Stopping	– La détection du front montant du signal <b>STOP</b> <sup>1</sup>
Tous les états <sup>2</sup>	Aborting	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La détection du front montant du signal <b>ABORT</b><sup>1</sup> OU</li> <li>– Lorsqu'une alarme avec une sévérité supérieure ou égale à <i>Pause</i> survient OU</li> <li>– Une alarme provenant du système FANUC s'active comme le relâchement du <i>Dead man's switch</i> du Terminal de programmation en mode manuel</li> </ul>

<sup>1</sup>Voir figure 4.17

<sup>2</sup>À l'exception de **Aborting** et **Aborted**

*Fin du tableau*



cuter un programme de manipulation. C'est la responsabilité du programme externe de s'assurer de l'ordre logique d'exécution.

#### 4.3.4 Modbus TCP/IP

Cette section a comme objectif de présenter sommairement le protocole de communication Modbus ainsi que les fonctions Modbus prises en charge par le serveur du contrôleur robot (MBSVR). Modbus est un protocole de communication industriel non propriétaire développé par Modicon en 1979. Il sert notamment à créer des liaisons de type client-serveur entre deux systèmes ordinés connectés à un même bus de terrain. Il est principalement utilisé pour échanger de l'information concernant les entrées/sorties numériques et analogiques d'un dispositif de contrôle. Initialement un protocole RTU (*Remote Terminal Unit*), il a été adapté pour les réseaux TCP/IP. Les caractéristiques générales du protocole Modbus TCP/IP se résument aux points suivants :

- Il est un protocole simple ;
- La spécification est libre de droits et publiquement disponible ;
- Il utilise le standard Ethernet et la couche de transport et réseau TCP/IP ;
- Il est largement utilisé industriellement ;
- Par défaut, le port 502 TCP est dédié à la communication Modbus.

##### Serveur Modbus

En date de cette rédaction, le serveur Modbus de l'unité robot réalise six fonctions érigées selon les documents de spécifications de l'organisation Modbus[52] : *Modbus Messaging On TCP/IP Implementation Guide Protocol* et *Modbus Application Protocol*. Sommairement, ces fonctions permettent de lire et d'écrire sur certains registres mémoires (REG) et sorties numériques (DOUT) du contrôleur robot. Le tableau 4.18 présente les quatre types de données (blocs d'adresses) définis par Modbus alors que le tableau 4.19 montre la correspondance entre les blocs d'adresses et celles des E/S du contrôleur robot. La conception du serveur Modbus a arbitrairement établi la plage d'adresses Modbus. Il est à noter que l'unité robot utilise les DOUT comme des entrées et sorties du point de vue d'un client Modbus. De plus, pour représenter un registre robot de 32 bits, il a fallu utiliser deux registres Modbus. Afin de bien distinguer un registre robot entier d'un registre réel, le serveur a fixé différentes plages d'adresses. Bref, le tableau 4.20 présente la liste des fonctions Modbus mises en œuvre par la tâche MBSVR.

---

Tableau 4.18 Présentation des différentes tables de données du protocole Modbus [52]

Primary tables	Object type	Type of	Comments
Discretes Input	Single bit	Read-Only	This type of data can be provided by an I/O system.
Coils	Single bit	Read-Write	This type of data can be alterable by an application program.
Input Registers	16-bit word	Read-Only	This type of data can be provided by an I/O system
Holding Registers	16-bit word	Read-Write	This type of data can be alterable by an application program.

Tableau 4.19 Correspondance des tables de données Modbus aux E/S du contrôleur FANUC

Table Modbus	Blocs d'adresses Modbus (hex)	Blocs d'E/S robot		
		Type	Intervalle	Total
Coils	0x8000 - 0x807F	DOUT	[129 - 256]	128
Inputs	0x8000 - 0x807F	DOUT	[001 - 128]	128
Input Registers	0x8000 - 0x803E	REG	[001 - 032]	32
	0x9000 - 0x903E	REG	[065 - 096]	32
Holding Registers	0x8000 - 0x803E	REG	[033 - 064]	32
	0x9000 - 0x903E	REG	[097 - 128]	32

Tableau 4.20 Fonctions réalisées par le serveur Modbus de l'unité logique robot

Fonction Modbus	Code (hex)	Description
Read Coils	01 (0x01)	Lit l'état d'un ou plusieurs DOUT contigus du contrôleur robot.
Read Inputs	02 (0x02)	Lit l'état d'un ou plusieurs DOUT contigus du contrôleur robot. Les DOUT de cette plage ont un accès en lecture seulement.
Read Holding Registers	03 (0x03)	Lit l'état d'un ou plusieurs registres entiers ou réels du contrôleur robot. Il faut fournir un minimum de deux adresses Modbus pour lire un registre robot. De plus, il faut s'assurer que l'ordre des adresses ne se chevauche pas, c'est-à-dire qu'une paire d'adresses Modbus coïncide bien à un registre robot. La première adresse Modbus de la paire correspond aux 16-bit les plus significatifs alors que la seconde correspond aux 16-bit les moins significatifs.
Read Input Registers	04 (0x04)	Lit l'état d'un ou plusieurs registres entiers ou réels du contrôleur robot. Ces registres sont en lecture seulement. Les mêmes principes que la fonction <b>Read Holding Registers</b> s'appliquent à cette fonction.
Write Single Coil	05 (0x05)	Change l'état logique d'un DOUT à l'état spécifié (ON ou OFF).
Write Multiple Registers	16 (0x10)	Écrit la valeur spécifiée (basée sur deux registres Modbus) sur un registre entier ou réel selon la plage d'adresse utilisée. Cette fonction accepte l'écriture d'un seul registre robot à la fois afin d'éviter de gérer les cas où un nombre impair d'adresses Modbus est fourni.

### 4.3.5 Manipulations robots

Présentement, l'application de contrôle robot propose quatre séquences de manipulations exécutables depuis le client Modbus :

- Saisie du porte-échantillon à la station de caractérisation (J\_PICK) ;
- Placement du porte-échantillon à la station de caractérisation (J\_PLACE) ;
- Polissage de l'échantillon (J\_POLISH) ;
- Rinçage et séchage de l'échantillon (J\_RINSE).

Chacun de ces programmes de manipulation utilise des registres prédéfinis comme paramètres d'entrée et certains d'entre eux surveillent des DOUT spécifiques pour enchaîner les étapes de la manipulation. La conception de ces séquences a nécessité l'élaboration de quelques systèmes de coordonnées afin de simplifier les manipulations aux différentes stations de travail. Les sous-sections suivantes présentent d'abord les référentiels utilisés par l'application et expliquent ensuite la conduite logique de ces séquences.

#### Système de coordonnées

Le système FANUC propose deux types de référentiels utilisateur : de travail (UFRAME) et d'outil (UTOOL). Ces systèmes de coordonnées consistent en des décalages de positions et d'orientation par rapport au système d'axes d'origine du robot tel qu'illustré à la figure 4.18.

Actuellement, les programmes de manipulation emploient quatre référentiels de travail, présentés au tableau 4.21. Les UFRAME 1 à 3 sont les systèmes de coordonnées de travail pour les trois stations de la machine. Essentiellement, ceux-ci correspondent à la normale au centre de la face du dessus du porte-échantillon (voir la figure H.7a) lorsque celui-ci est : 1) en place sur la station de caractérisation ; 2) en place sur le support pneumatique surélevé de la station de polissage ; 3) en place sur la cuve de nettoyage. Une contrainte importante de la disposition physique des sous-systèmes du Métallographe 3D fait en sorte que ces référentiels doivent être réenseignés si la station de caractérisation ou la machine est déplacée. Cependant, puisque les programmes de manipulation utilisent uniquement des positions enseignées par rapport à ces UFRAME, il n'est pas nécessaire de modifier ces programmes si les UFRAME sont adéquatement calibrés.

Par la suite, les séquences de manipulations utilisent deux référentiels outil permettant de simplifier les diverses manipulations avec le porte-échantillon. De plus, le système définit un référentiel outil supplémentaire, non utilisé dans les programmes, afin de simplifier l'enseignement des UFRAME par rapport à la pince pneumatique. Le tableau 4.22 identifie ces référentiels outil. Les programmes de manipulation se chargent de modifier dynamiquement

le **UTOOL** ou **UFRAME** au cours des manipulations en fonction de la station de travail et si le robot agrippe ou non le porte-échantillon.

Prendre note que ce document n'explique pas les procédures pour paramétrer ces types de référentiels. Il convient au lecteur de consulter la documentation FANUC qui explique ces procédures en détail.

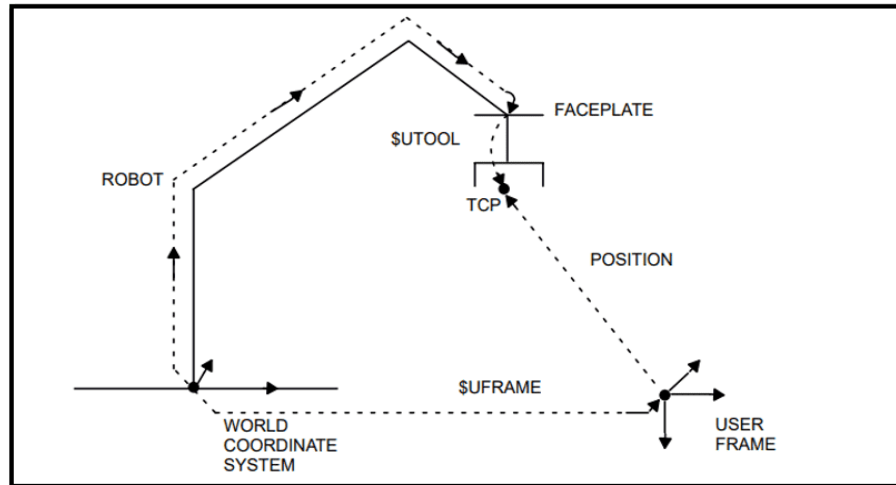


Figure 4.18 Schématisation du système de coordonnées d'un bras robotisé FANUC [53]

Tableau 4.21 Référentiels de travail employés par les programmes de manipulation robotisée

UFRAME[ID]	Description
UFRAME[0]	Référentiel d'origine du robot ( <i>world</i> ).
UFRAME[1]	Référentiel de travail du sous-système de caractérisation.
UFRAME[2]	Référentiel de travail du sous-système de polissage.
UFRAME[3]	Référentiel de travail du sous-système de nettoyage.

Tableau 4.22 Référentiels outil employés par les programmes de manipulation robotisée

UTOOL[ID]	Description
UTOOL[1]	Référentiel outil d'origine (EEOT or FACEPLATE).
UTOOL[2]	Référentiel outil situé au centre de la pince lorsque celle-ci est étendue au maximum.
UTOOL[3]	Référentiel outil de la pointe d'un des doigts de la pince pneumatique. Ce référentiel est utilisé uniquement pour aider à définir les UFRAME.

# CHAPITRE 5

## EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS

Ce chapitre discute des différentes expériences, analyses et résultats des fonctions de service de l'équipement, c'est-à-dire des séquences expérimentales automatisées du cycle d'analyses métallographiques. À la fin, ce chapitre présente les résultats de la dernière séance de métallographie pratiquée, effectue un retour sur les spécifications du CdCF du tableau 3.3 et propose une procédure pour pratiquer ou répéter ce type d'expérience à l'aide du système de contrôle final.

Au terme du projet de recherche, le Métallographe 3D est capable d'exécuter quelques séquences automatisées en mode manuel. Inévitablement, la conception de ces séquences a rencontré quelques contraintes et problèmes techniques qui ont mis en doute les critères de répétabilité de ces fonctions. Les sections suivantes présentent les différents problèmes rencontrés à ce sujet. Somme tout, en effectuant quelques opérations manuelles à travers les séquences, il est possible de réaliser des cycles d'analyses métallographiques semi-automatisés et de produire des données expérimentales intéressantes et encourageantes comme la section 5.5 le dévoile. La version finale du **Metallograph Cockpit** reflète bien l'ensemble des outils et fonctionnalités offert par le Métallographe 3D. À ce sujet, l'annexe G présente cet outil et les principales commandes de pilotage de l'équipement.

### 5.1 Séquence de caractérisation de surface

La fonction **Data Acquisition** du **Metallograph Cockpit** réalise la séquence expérimentale de caractérisation 2D de surface. L'objectif principal de cette fonction est de déplacer précisément et automatiquement l'objectif (OBJ-F) et le palpeur (Z-TIP) du microscope aux positions d'intérêt et d'effectuer les mesures nécessaires (images et mesure de l'épaisseur relative) selon les paramètres de caractérisation fournis 4.2.3. La figure F.1 en annexe illustre le déroulement logique de cette séquence. Cette dernière comprend deux sous-fonctions : palpé localisé et mise au point automatique et métallographie en polarisation croisée. Celle-ci répète ces deux fonctions pour chacune des régions d'intérêt définies dans les paramètres. Bien que cette séquence s'exécute bien dans son ensemble, elle présente quelques difficultés de répétabilité et elle n'atteint pas toujours les spécifications de qualités souhaitées telles des images nettes et des mesures précises de surface. Les sous-sections suivantes discutent des aspects techniques de ces sous-fonctions.

### 5.1.1 Palpage localisé et mise au point automatique

L'idée derrière la séquence de palpage localisé et de mise au point était d'utiliser la mesure du palpeur pour positionner automatiquement l'objectif du microscope à la région d'analyse spécifiée. En principe, en connaissant la position relative  $(x, z)$  entre la pointe du palpeur (Z-TIP) et le plan focal de l'objectif (OBJ-F), et que Z-TIP se déplace précisément le long de l'axe Z du microscope (tel que conçu), alors il est envisageable de positionner OBJ-F par rapport à une mesure de Z-TIP. Cependant, les nombreuses expérimentations réalisées pour développer et tester cette fonction ont révélé plusieurs adversités. À certaines occasions, le système d'acquisition n'arrivait pas à faire une mise au point adéquate, résultant à des images floues.

Avant d'arriver à la version finale de la fonction de mise au point automatique, des tests élémentaires de linéarité, de répétabilité, de mesures temporelles et autres ont aidé à comprendre les différentes contraintes du système de mesure de surface. Ces expériences ont mené à plusieurs constatations :

- Les déplacements de l'axe Z correspondent aux mesures du palpeur à l'intérieur de leur résolution respective ;
- Le système en boucle fermée de l'axe Z est hypersensible aux vibrations environnantes. Un délicat coup à la base du microscope ou un roulement de chaise à proximité du système de caractérisation était suffisant pour faire osciller la position de l'axe de plusieurs microns ;
- Parfois, l'écart enregistré entre la position réelle et cible en Z pouvait atteindre au-delà de 5  $\mu\text{m}$ , ce qui est 50 fois plus élevé que la résolution de déplacement théorique de 100 nm (tableau 4.2) ;
- Il existe un décalage non négligeable entre le moment où le palpeur effectue une lecture et le moment de l'enregistrement de la position réelle de l'axe Z. Ce décalage est, au minimum, d'une période ou plus du temps de cycle PLC (5 ms) limité par le mécanisme événementiel ADS entre les systèmes PC-PLC ;
- Les tests de répétabilité pour la mise au point automatisée ont démontré que la position relative entre OBJ-F et Z-TIP n'était pas fiable ou suffisamment précise. Il fallait ré-évaluer cette valeur à chaque nouvel échantillon ou après un certain temps d'inutilisation (quelques heures) de l'équipement. Ce constat sous-entend que, physiquement, la position relative entre les deux effecteurs fluctue dans le temps. Des facteurs tels que la dilatation thermique et des déplacements microscopiques au niveau de l'assemblage de la station du microscope sont susceptibles d'altérer cette valeur. Les expériences pratiquées n'ont pas évalué ces hypothèses plus en profondeur ;



- Des facteurs surfaciques tels que la propreté, la rugosité et la dureté de surface influencent énormément sur l'exactitude d'une mesure :
  - Si la surface de l'échantillon n'est pas propre (p. ex. après un mauvais nettoyage), la pointe du palpeur peut mesurer un résidu macro/microscopiques et conduire à une erreur ;
  - Lors des tests de polissage, le système de caractérisation a mesuré des avances négatives (gain de matière), ce qui est invraisemblable. L'analyse de ces expériences révèle que si la rugosité de surface de l'échantillon n'est pas en deçà d'un certain seuil de planéité (non évalué), les mesures ne sont pas valables. Seuls des finis de surface à 0.25  $\mu\text{m}$  ont démontré des résultats rationnels et concluants ;
  - Des mesures répétitives, en contact/hors contact, au même endroit sur un échantillon créent une sorte de « cratère microscopique » lorsque le matériel n'est pas très dur tel que l'époxy.

Les correctifs apportés à la fonction de mesure de surface ont cherché à éliminer les problèmes d'oscillation (sensibilité) et de décalage temporel des mesures. La base de ces corrections repose sur une méthode de synchronisation d'horloge entre les deux systèmes distribués. Celle-ci utilise l'horloge système Windows de haute précision (**FileTime**) présente au niveau du PC et du PLC. La valeur de cette horloge est un nombre entier non signé de 64-bit et représente le temps écoulé, d'une résolution de 100 ns, depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1601, 00:00 UTC. La séquence de palpation localisée et de mise au point automatique se décompose en trois sous-séquences. L'énumération qui suit explique le déroulement de cette méthode.

1. Déplacement de Z-TIP à une position  $(x, z)$  et à une mesure du palpeur cible ( $\Delta Z$ ) :
    - 1.1. Démarrage du mode de lecture continu du palpeur ;
    - 1.2. Vérification des conditions logiques pour savoir si Z-TIP doit se déplacer en X. Si c'est le cas, l'axe Z se rétracte de 1 mm (si la position actuelle le permet) plus la dernière lecture du palpeur (si valide). Cette procédure évite de déplacer Z-TIP sur la surface de l'échantillon lors des déplacements pour ne pas l'endommager ;
    - 1.3. Déplacement de l'axe X à la position cible ;
    - 1.4. Déplacement de l'axe Z, à basse vitesse, jusqu'à l'obtention d'une lecture valide du palpeur ;
    - 1.5. Arrêt de l'axe Z ;
    - 1.6. Déplacement relatif de l'axe Z par rapport à la dernière lecture pour atteindre la valeur cible.
-

2. Prise de mesure suivie d'un ajustement temporel et validation de la mesure de Z-TIP (explications supplémentaires au paragraphe suivant) :
  - 2.1. Demande de la valeur de l'horloge du système PC (`FileTime`) ;
  - 2.2. Mesure du palpeur avec un horodatage (`FileTime`) du système PC ;
  - 2.3. Conversion de l'horodatage PC du palpeur dans le système temporel TwinCAT ;
  - 2.4. Enregistrement d'une plage de valeur entre -2.5 à 2.5 ms autour du moment de la mesure, par intervalle de 100  $\mu$ s résultant à 51 valeurs de l'encodeur de l'axe Z (ENC-Z). Le système TwinCAT garde en mémoire une fenêtre de  $\pm 2.147$  secs des positions antérieures/postérieures pour chaque axe NC [50] ;
  - 2.5. Vérification de l'étendue des positions de cette fenêtre pour savoir si elle dépasse la zone de tolérance de la position cible (100 nm) :
    - 2.5.1. Si le test réussit, la fonction considère la mesure comme valide et le système garde en mémoire la valeur de la mesure, les horodatages, le décalage temporel ainsi que la position des axes ( $x, z$ ) et retourne un succès ;
    - 2.5.2. Si le test échoue, la fonction exige une nouvelle mesure et répète les étapes à partir de 2.1. Si cinq lectures consécutives échouent, alors la fonction retourne une erreur.

La synchronisation ou l'ajustement temporel des horloges s'effectue en fonction d'un calcul expérimental, inspiré de l'algorithme de Cristian [54], spécialement adapté pour les deux systèmes ordonnés. À la différence de l'algorithme de Cristian, ce calcul ne peut pas assumer que les temps de transport pour la transmission et la réception de la valeur de l'horloge sont équivalents. Le mécanisme d'écriture et de lecture au moyen d'ADS se produit exclusivement de manière synchrone et jamais pendant la phase d'exécution d'un cycle PLC. En ce qui concerne le calcul du décalage temporel, celui-ci s'effectue durant cette phase d'exécution. Bref, cette fonction de synchronisation permet de calculer le décalage temporel entre le système PC et PLC avec une résolution de 100 ns, mais avec une incertitude d'un demi-temps de cycle PLC, c'est-à-dire de 2.5 ms.

En évaluant la différence des positions de l'axe Z pour une fenêtre temporelle de  $\pm 2.5$  ms autour de l'heure ajustée de la mesure, le système est capable de déterminer si la mesure s'est produite lors d'une phase oscillatoire du microscope. Les tests effectués à l'aide de cette méthode expérimentale ont été concluants. Même en vibrant légèrement le microscope, celui-ci a réussi à plusieurs reprises à prendre des mesures et à se positionner correctement par la suite. Il a également permis de détecter des oscillations trop importantes de l'axe Z. Quoique cette solution fonctionne bien, elle ne corrige pas les mauvaises surfaces ou l'imprécision de la position relative avec les deux effecteurs OBJ-F et Z-TIP.

3. Mise au point automatique en fonction de la mesure de surface validée :
  - 3.1. Déplacement de l'axe Z à une position sécuritaire pour les prochains déplacements ;
  - 3.2. Déplacement relatif de l'axe X par rapport à la position actuelle dans le système de coordonnées de OBJ-F ;
  - 3.3. Déplacement relatif de l'axe Z par rapport à la mesure de Z-TIP et à la position actuelle dans le système de coordonnées de OBJ-F.

Enfin, les expériences avec la version finale de la séquence de palpement et mise au point automatique présentaient des résultats concluants. Cependant, à l'occasion, la mise au point échouait de quelques microns en Z ( $\pm 5 \mu\text{m}$ ) principalement lorsque l'échantillon changeait ou après un long temps d'inutilisation. En cas de raté, il est possible à l'aide du **Metallograph Cockpit** de piloter manuellement l'axe Z afin de corriger la mise au point, mais ceci n'est pas désirable pour une séquence automatisée. Pour corriger ce problème, il est possible d'ajuster la position relative entre le plan de l'objectif (OBJ-F) et la pointe du palpeur (Z-TIP) en suivant la procédure à l'annexe [H.1.5](#). Cependant, cette procédure n'est pas précise car elle est principalement subjective.

Pour obtenir une séquence de mise au point plus robuste, il faudrait calibrer la position relative à l'aide d'un objet avec une surface très dure et une rugosité de surface inférieure ou égale à la résolution du palpeur. De plus, l'ajout d'un algorithme d'imagerie basé sur la netteté d'image serait capable de corriger ou de valider la mise au point automatique au besoin. Techniquement, l'infrastructure logicielle du **Metallograph Cockpit** a tous les outils nécessaires pour réaliser une telle fonctionnalité sans ajouter de bibliothèques logicielles ou d'équipements supplémentaires.

### 5.1.2 Métallographie en polarisation croisée

La séquence de métallographie consiste en quelques étapes très simples illustrées à la figure [F.2](#). L'objectif de cette fonction est de produire les mêmes résultats lorsque les mêmes paramètres d'imagerie sont utilisés. Malgré sa simplicité, cette procédure a fait face à quelques difficultés.

Durant sa conception, des tests élémentaires de répétabilité ont cherché à prouver que le déplacement absolu des filtres polarisateurs et l'utilisation de paramètres identiques reproduisaient toujours la même image. Ces expériences ont dénoté quelques préoccupations :

- À l'occasion, les moteurs des filtres polarisants n'atteignaient pas leurs positions cibles. Les moteurs se déconnectaient et les contrôleurs numériques n'indiquaient aucune information ou source d'erreur. Plutôt, ils indiquaient qu'ils étaient encore fonctionnels ou

même en mouvement alors qu'ils ne bougeaient plus. La figure 5.1 présente un résultat de ce problème suite à dix répétitions de va-et-vient de la position de référence à une position cible pour les deux moteurs. À cette figure, il est clairement visible qu'à deux reprises, les moteurs des filtres polarisants n'ont pas réussi à atteindre la position de consigne alors que ceux-ci indiquaient avoir atteint leur cible.

- Il existe un désalignement non négligeable entre le filtre analyseur et l'axe optique du microscope. Ce désalignement crée un effet de translation du champ de vue. La figure 5.2 illustre ce phénomène pour deux positions différentes du filtre.

La version finale de la séquence de métallographie a réussi à corriger le problème de repositionnement des filtres en réduisant les paramètres de vitesse maximale des moteurs. En ce qui concerne le désalignement optique, la recherche n'a pas évalué si ces effets provoquaient d'autres types de distorsion optique autres que celles de translation ou rotation comme identifiées. Si c'est le cas, il faudrait évaluer si ces distorsions nuisent à la modélisation inverse et corriger les défauts de l'axe optique du microscope en conséquence. Néanmoins, de simples algorithmes d'imagerie de mise en registre seraient en mesure résoudre les problèmes de translations.

Un autre point qui serait intéressant à explorer est la formulation d'une équation mathématique du temps d'exposition (luminosité) en fonction de la combinaison des angles du polariseur et de l'analyseur. Avec cette information, cela permettrait de simplifier les manipulations pour paramétrer les analyses métallographiques d'un échantillon. Pour l'heure, l'utilisateur doit déterminer et fournir à l'avance au système la combinaison des paires d'angle des polariseurs et le temps d'exposition, ce qui n'est pas une opération triviale avec un nouvel échantillon.

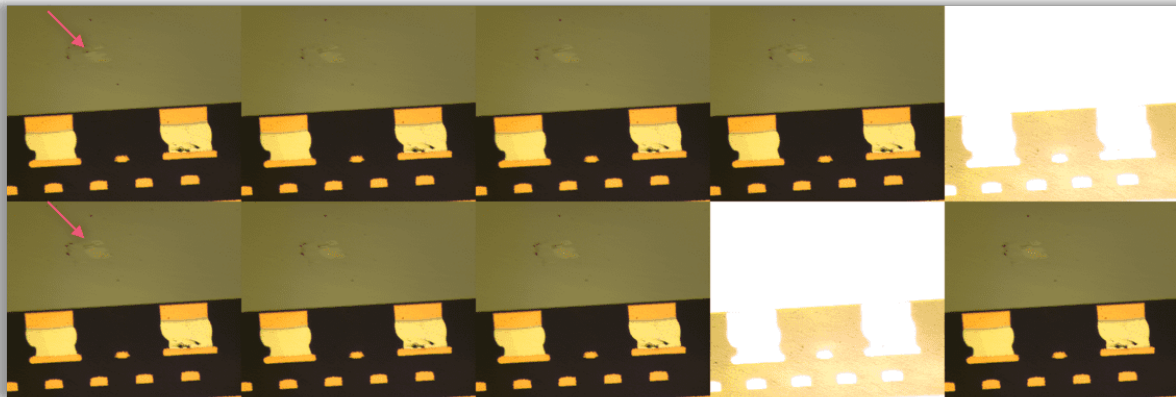


Figure 5.1 Montage photo de dix images à la suite d'un test de répétabilité avec les filtres polarisants et la caméra numérique

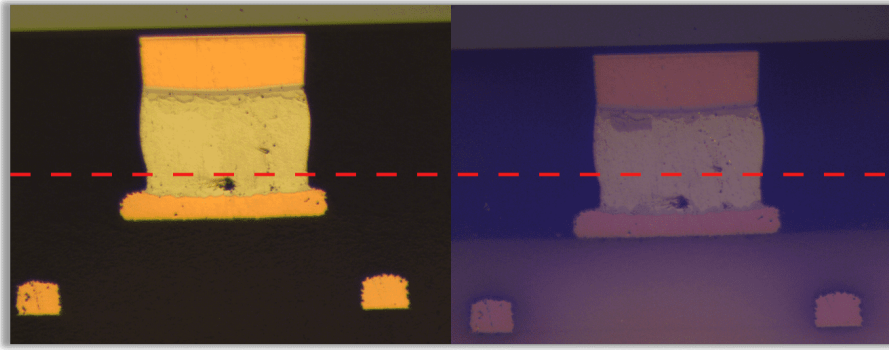


Figure 5.2 Exemple de deux images, capturées à la même position et recadrées au même endroit, avec des angles différents pour l'analyseur et un angle constant pour le polariseur

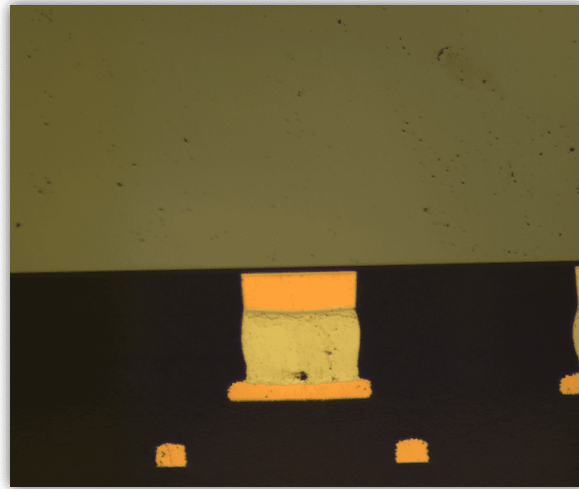


Figure 5.3 Exemple d'une image d'un C4 en haute résolution 2448 x 2048 pixels

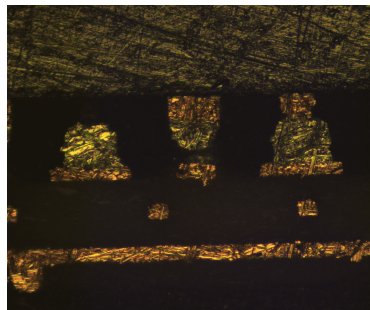
## 5.2 Séquence préparation de surface

L'application de contrôle du Métallographe 3D offre deux séquences automatisées pour la préparation de surface d'un échantillon : sablage (**Grind**) et polissage (**Polish**). Les principaux objectifs de ces séquences sont de réaliser des avances de près de 1  $\mu\text{m}$  et d'obtenir un fini de surface suffisamment lisse et uniforme pour la métallographie en polarisation croisée. Ces deux fonctions sont pratiquement identiques à l'exception que la première utilise un écoulement d'eau pendant le polissage alors que la deuxième utilise un débit de lubrifiant et d'abrasif liquide. Les figures [F.3](#) et [F.4](#) schématisent les étapes et indiquent les conditions initiales de ces séquences.

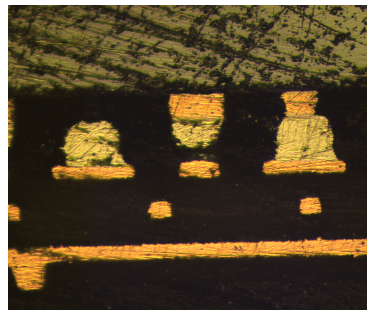
Les expériences réalisées avec les séquences de sablage et polissage ont utilisé des papiers de prépolissages de #400, #600, #800 et #1200 et des draps et solutions de polissage de 3  $\mu\text{m}$  et 0.25  $\mu\text{m}$ . La figure [5.4](#) montre, à titre d'exemple, quelques résultats suite

à des séquences de sablage ou polissage pour différentes combinaisons de paramètres et matières d'œuvre. Ces expériences et résultats préliminaires ont rapidement démontré qu'il était possible de contrôler des avances de quelques microns à plusieurs millimètres avec seulement le matériel disponible. Cependant, comme les autres séquences, la réalisation de ces tests a aussi révélé quelques complications :

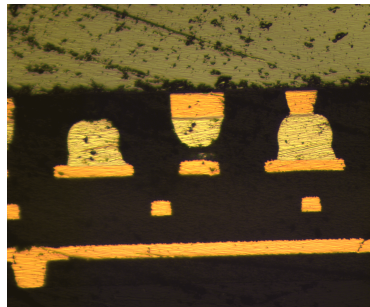
- Parfois durant un polissage, le drap ou papier restait coincé entre l'échantillon et le plateau et n'était pas entraîné par la table rotative. Or, il est possible d'éviter ce phénomène si la surface du drap/papier est suffisamment lubrifiée.
- Les débits du lubrifiant et de l'abrasif liquide des pompes péristaltiques sont insuffisants. Il faudrait augmenter le diamètre des tubes pour offrir de plus grands débits.
- La solution artisanale mise en place pour acheminer les liquides de polissage (initialement absente), c'est-à-dire l'ajout d'embouts d'égouttement, présente un effet de capillarité non négligeable qui retarde la précipitation des gouttes de solutions sur le plateau de polissage. Ceci empêche d'avoir un contrôle précis du débit des solutions durant le polissage.



(a) Papier sablé #800



(b) Papier sablé #1000



(c) Polissage avec solution et drap 3  $\mu\text{m}$



(d) Polissage avec solution et drap 0.25  $\mu\text{m}$

Figure 5.4 Quatre résultats pour différentes expériences de prépolissage et polissage



En bref, les expériences pratiquées avec le pilotage de la station de préparation ont mené aux conclusions suivantes :

- ▶ Seuls les échantillons polis avec une séquence de polissage de 0.25  $\mu\text{m}$  offrent un fini de surface traitable pour la caractérisation (microscopie en lumière polarisée et mesure de surface) ;
- ▶ Le polissage de surface avec du 0.25  $\mu\text{m}$  pour effectuer des avances n'est pas concluant et n'est pas recommandé. Les draps s'usent rapidement et l'opération doit durer plusieurs minutes avant de mesurer une avance de plus d'un micron ;
- ▶ Le passage d'une séquence de sablage à une séquence de polissage de 0.25  $\mu\text{m}$  n'est pas suggéré. Les rayures résultantes du sablage sont trop profondes et ne sont jamais proprement polies par le polissage et sont indésirables pour la microscopie en lumière polarisante ;
- ▶ Un polissage de 3  $\mu\text{m}$  permet des avances de quelques microns en peu de temps (voir la figure 5.5). De plus, le tapis est beaucoup plus résistant et il est réutilisable pour plusieurs séquences de sectionnement ;
- ▶ Une alternance de polissage de 3  $\mu\text{m}$  pour les avances et de polissage de 0.25  $\mu\text{m}$  pour le fini de surface a donné les meilleurs résultats en termes de temps, qualité et coût pour réaliser des coupes sectionnelles.

En suivant la procédure décrite à l'annexe H, il a été possible de pratiquer une préparation de surface dans le but d'aplanir (phase de préparation initiale) et d'effectuer des coupes sectionnelles d'un échantillon. Cependant, d'un point de vue d'automatisme, il reste encore quelques points à corriger : 1. améliorer le système de maintien des tapis et papier sablé ; 2. améliorer les débits de lubrifiant et abrasif ; 3. changer le type d'embouts d'égouttement des solutions pour quelque chose de plus adapté ; 4. définir un ensemble de paramètres par type de papier et drap dans les paramètres métallographiques.

Pour conclure, des solutions ou expériences intéressantes qui contribueraient à l'amélioration des séquences de sablage et de polissage seraient de :

- ▶ Fabriquer une réplique du disque de polissage pour éviter de toujours nettoyer la station (gain en temps) ;
  - ▶ Déterminer les paramètres optimaux en fonction de la matière d'œuvre de sablage/polissage utilisée ;
  - ▶ Déterminer la course de compression optimale de la pince de préhension (actuellement régler environ à mi-chemin) lors du polissage ;
  - ▶ Établir les débits en fonction de la vitesse des pompes péristaltiques pour le type de tuyau employé ;
-

- Déterminer l'effet de rotation (vitesse, amplitude, position de l'échantillon sur le plateau, etc.) du poignet robot lors du polissage ;
- Effectuer des tests de pression (points de contact) avec un échantillon à différents endroits stratégiques sur la polisseuse et avec différentes matières d'œuvre (papier, drap, sans matière, etc.) ;
- Effectuer des tests de performance avec d'autres types de polissage, par exemple du 1  $\mu\text{m}$  (commerciallement disponible).



Figure 5.5 Pile d'images à la suite de coupes sectionnelles par polissage de 3  $\mu\text{m}$  durant 30 secs, où la première image est l'échantillon avant les coupes

### 5.3 Séquence de nettoyage de surface

Le Metallograph Cockpit possède deux fonctions pour le nettoyage de surface : savonnage (Wash) et nettoyage (rinçage et séchage) (Clean). L'objectif de ces fonctions est de retirer tout résidu à la surface de l'échantillon après un polissage avant la caractérisation. Au final, seule la séquence de nettoyage est fonctionnelle. Les figures F.5 et F.6 décrivent les étapes et conditions d'utilisation de la séquence finale de nettoyage.

Les tests réalisés lors de l'élaboration des séquences de nettoyage étaient, encore une fois, très élémentaires. Les tests préliminaires de la séquence de savonnage ont révélé que :

- Il est inconcevable de développer un programme de manipulation robot pour effectuer les déplacements de l'échantillon en contact avec la brosse de savonnage :
  - Le système actuel ne permet pas de définir la position relative de la surface de l'échantillon par rapport au centre de l'effecteur de terminaison du robot, car l'orientation du plan d'inspection varie selon l'ajustement fait avec le croisillon du porte-échantillon. Il n'est pas possible avec le palpeur d'évaluer l'orientation de la



surface puisque ce dernier se déplace uniquement sur le seul plan  $XZ$ , l'axe  $Y$  étant fixe. Il faut un minimum de trois mesures non alignées pour évaluer adéquatement l'orientation en trois dimensions ;

- La brosse est instable lorsqu'elle tourne, c'est-à-dire qu'elle dévie de son axe de rotation (dizaines de millimètres). Elle aurait besoin d'un ajustement mécanique ;
- L'assemblage actuel de la pince avec le porte-échantillon agrippé n'est pas suffisamment rigide. Il faudrait corriger les petits défauts de désalignement du guide linéaire de la pince de préhension. Les autres stations permettent toutes une certaine manœuvrabilité à cet égard tandis que la brosse de savonnage nécessite un référencement précis du plan normal de l'échantillon pour effectuer cette tâche.

Bref, pour créer une séquence de savonnage, le robot doit simultanément pousser et appliquer une force minimale sur la brosse avec la surface de l'échantillon, avec un angle d'approche précise, ce qui est actuellement impossible à pratiquer, car l'orientation du plan de l'échantillon est indéterminée. Ces constats ont amené à la décision de ne pas poursuivre le développement de cette séquence puisqu'elle exigeait du temps et des efforts considérables pour peu de valeur ajoutée au processus métallographique.

Ensuite, la conception de la séquence automatisée de rinçage et séchage a également révélé quelques défis techniques :

- L'ajustement de la hauteur, le nombre et le positionnement des buses se font de façon arbitraire. Il n'est pas évident d'ajuster la distance de travail, la pression et les débits des jets d'air et d'eau pour obtenir un nettoyage acceptable. La longueur et l'emplacement variables de l'échantillon d'une expérience à une autre (12 à 40 mm) complexifient l'ajustement ;
- Un nettoyage trop prêt (pression de contact trop forte) peut endommager la surface de l'échantillon. En contrepartie, un nettoyage trop loin de l'échantillon est inefficace, nécessite plus de temps et la cuve atteint rapidement sa capacité maximale de rétention ;
- De l'eau se retrouve au niveau du croisillon du porte-échantillon et celle-ci n'est pas expulsée par les jets d'air lorsque le porte-échantillon est à sa position d'assise sur la cuve. Il est nécessaire de sortir l'échantillon à l'extérieur de la cuve pour retirer cette eau.

La séquence finale a cherché à corriger quelques-unes de ces lacunes. Le dernier ajustement des jets d'eau et d'air a découlé à la centralisation du flux des jets sur le deuxième emplacement du porte-échantillon. De plus, il a fallu augmenter le débit d'air en changeant les conduits et composants générant le flux d'air. En ce qui concerne le programme de

---

manipulation robot, celui-ci effectue un séchage de l'échantillon et porte-échantillon en trois étapes :

1. À l'extérieur, le robot incline le porte-échantillon au-dessus de la cuve pour évacuer l'excédant d'eau ;
2. Le robot repositionne le porte-échantillon dans la cuve pour un séchage interne statique ;
3. Le robot se déplace verticalement en alternance à l'extérieur et à l'intérieur de la cuve pendant que le jet d'air est en marche.

Avec la séquence finale de nettoyage, il a été possible d'obtenir des échantillons propres à la suite d'une séquence de polissage lorsque le temps de séchage extérieur était suffisamment long (>60 secs). En général, le dernier arrangement du flux d'eau permettait de retirer tout résidu à la surface du spécimen. L'élément limitant ou problématique de la séquence est le flux d'air qui nécessite encore des ajustements. Pour l'améliorer, il faudrait un système de flux plus homogène et non orienté face à l'échantillon pour diminuer les risques de dommage. Pour cela, il serait intéressant de comparer la performance de séchage entre un flux d'air latéral à la place d'un flux vertical combiné au déplacement robotisé. Bref, il serait également pertinent d'analyser l'utilité de la séquence de savonnage et la valeur ajoutée au système, s'il est possible de retirer tous résidus simplement avec le rinçage et le séchage.

## 5.4 Séquence de saisie et placement du porte-échantillon

Pour exécuter les séquences nécessitant le bras robotisé, il faut que le robot empoigne le porte-échantillon selon une orientation bien précise. Pour cette raison, le **Metallograph Cockpit** possède les séquences de saisie et placement (*pick and place*) qui automatise cette opération. Ces fonctions représentent essentiellement les programmes de manipulation robot **J\_PICK** et **J\_PLACE**, décrits à l'annexe [F.4](#). Ces séquences possèdent quelques contraintes découlant des limitations du système. D'abord, l'utilisateur doit s'assurer que la station de caractérisation soit bien référencée au système de coordonnées robots (voir [4.3.5](#)). Il faut également que l'utilisateur spécifie le décalage de saisie à la station de microscopie dans les paramètres métallographiques (**HandlingInfo**). La détermination du référentiel de travail de la station de caractérisation a fait en sorte de correspondre précisément son axe Y à l'axe linéaire de décalage du microscope (axe Y). Actuellement, le système métallographique ne dispose d'aucun moyen pour déterminer et valider ces variables, indispensables pour la saisie et le placement automatique du porte-échantillon.

---

En général, le système du bras manipulateur exerce bien son rôle et offre une bonne précision et répétabilité malgré son âge avancé. Cependant, l'équipement métallographique manque clairement de points de référence pour calibrer le robot par rapport aux différentes zones de travail, d'autant plus que ce dernier est fixé au sol et non à la structure de la machine. Essentiellement, ce qui donne la précision à un robot industriel c'est la précision à laquelle il est possible de déterminer les coordonnées d'une zone de travail et d'un outil par rapport aux coordonnées de l'effecteur de terminaison robot (TCP). La mise en place de points stratégiques et la fabrication d'un outil de calibration personnalisé seraient judicieuses pour calibrer adéquatement le système robot. De plus, la solution de motoriser l'axe Y du microscope permettrait de connaître précisément la position du porte-échantillon à cette station, éliminant ainsi un paramètre utilisateur et les risques d'erreurs humaines. Avec ces solutions, il serait possible de localiser l'échantillon dans le porte-échantillon et même déterminer les coordonnées du plan normal, en se servant des axes du microscope et du palpeur numérique. Avec ce paramètre, il serait plus simple et efficace d'effectuer des manipulations localisées telles que le savonnage et le nettoyage.

## 5.5 Résultat final

Finalement, vers la fin du projet, une expérience partielle d'analyses métallographiques 3D a cherché à tester la performance globale du Métallographe 3D. Cette première expérience a permis d'élaborer une procédure détaillée pour pratiquer ou répéter une telle expérience avec le système actuel. À ce propos, l'annexe H présente celle-ci. La dernière séance métallographique a duré environ quatre heures et elle a produit deux piles de sept images (analyse 1 et 2). La figure 5.6 montre le résultat de l'analyse 2. Le tableau 5.1 présente les principaux paramètres employés pour cette expérience. Enfin, le tableau 5.2 fournit un récapitulatif des mesures et calculs de l'avance entre chaque coupe sectionnelle.

Tableau 5.1 Paramètres utilisés pour l'expérience finale d'analyses métallographiques

Paramètres de préparation de surface		
	Prépolissage	Polissage
Abrasif	3 $\mu\text{m}$	0.25 $\mu\text{m}$
Vitesse pompe d'abrasif ( $^{\circ}/\text{sec}$ )	Max	Max
Vitesse pompe de lubrifiant ( $^{\circ}/\text{sec}$ )	Max	Max
Durée (s)	30	60
Vitesse du joint 6 robot (%)	50	50
Angle de départ	0 $^{\circ}$	0 $^{\circ}$
Angle de fin (horaire)	135 $^{\circ}$	135 $^{\circ}$

⋮

	$\vdots$	
Angle de fin (anti-horaire)	0°	0°
<b>Paramètres de nettoyage</b>		
Temps de rinçage (s)	10	
Temps de séchage statique (s)	15	
Temps de séchage dynamique (s)	40	
<b>Paramètres de caractérisation</b>		
Nombre de région	1	
Nombre d'analyses	2	
	Analyse 1	Analyse 2
Angle polariseur	70°	45°
Angle analyseur	15°	185°
Temps d'exposition (ms)	23	35

*Fin du tableau*

Tableau 5.2 Mesures des avances de l'expérimentation finale

Section	Distance mesurée (mm)	Différence ( $\mu\text{m}$ )	Cumulatif ( $\mu\text{m}$ )
$i$	$Z_i$	$\Delta Z_i = Z_i - Z_{i-1}$	$\Delta Z_i$
1	15.2072	-	0.0
2	15.2140	6.8	6.8
3	15.2170	3.1	9.9
4	15.2195	2.5	12.3
5	15.2240	4.5	16.8
6	15.2265	2.5	19.3
7	15.2314	4.9	24.2

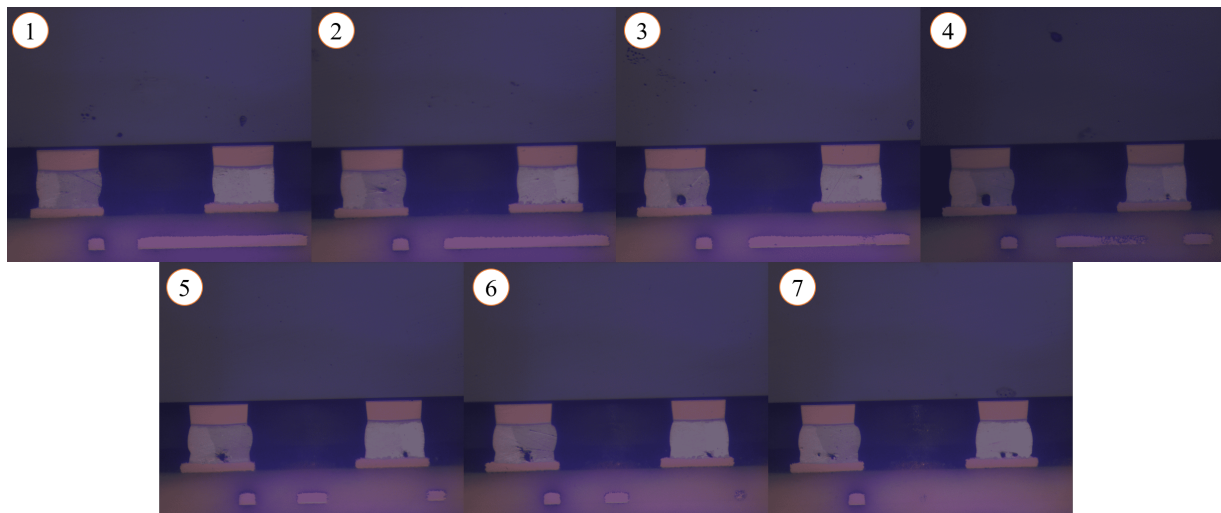


Figure 5.6 Résultat de la dernière expérience d'analyses métallographiques avec le système final

Les résultats de l'expérience ont permis de tirer quelques conclusions intéressantes. À l'exception des fonctions FC18 et FC19, le Métallographe 3D respecte l'ensemble du CdCF (tableau 3.3). En considérant les critères d'opération et de qualité, celui-ci est en mesure de caractériser un bon volume d'un échantillon, c'est-à-dire caractériser plusieurs régions de surface en une seule séance. À défaut de pratiquer le processus métallographique (cycle) manuellement, le système actuel dévoile déjà un potentiel pour simplifier la production de données 3D de la microstructure de C4. La dernière expérience ne démontre pas que le système respecte tous les critères de qualité énoncés (FC18), entre autres de créer des piles d'images en deçà du micron cubique, limité par la précision du polissage.

La dernière expérience a permis de réaliser des sectionnements compris entre 2.5 et 6.0  $\mu\text{m}$  avec un polissage de 3  $\mu\text{m}$  d'une durée de 30 secondes. Des ajouts manuels de lubrifiant et d'abrasif avant les séquences automatisées de polissage ont été nécessaires puisque le débit des pompes était insuffisant, ce qui peut expliquer en partie la variabilité entre les coupes. Avant d'exécuter la séquence de caractérisation 2D, il a fallu ajuster la position relative de l'objectif et du palpeur pour la mise au point automatique pour arriver à obtenir des images nettes. À l'exception des points mentionnés et des soucis déjà connus, les séquences métallographiques ont présenté des résultats satisfaisants pour un ensemble de paramètres non optimisé. Il n'a pas été nécessaire de répéter aucune séquence.

En ce qui concerne la cadence, le Métallographe 3D a besoin d'un peu de raffinement et d'optimisation comme discuté aux sous-sections précédentes pour atteindre le critère d'opération (FC19). Plusieurs facteurs et interventions manuelles entre chaque cycle ou séquence occasionnent des pertes de temps non négligeables, entre autres :

- En mode manuel, la vitesse du robot est limitée à 25% de sa vitesse maximale (mode T1) ;
- Il faut nettoyer la station de préparation de surface après chaque prépolissage pour ne pas contaminer le polissage ;
- Il faut faire l'installation et préparer la station pour le prépolissage ou polissage manuellement ;
- Le déplacement des filtres polarisants est très lent.

Cependant, l'estimation ci-après démontre que l'équipement serait en mesure de produire une cadence de production égale ou supérieure à celle visée (6 sections/heure).

Pour déterminer la cadence de production envisageable du métallographe 3D, une évaluation de performance a cherché à estimer le temps d'exécution des phases du processus en fonction de l'expérience finale et des considérations d'amélioration proposées. Cette analyse propose une estimation du temps d'exécution d'un point de vue optimiste (réalisable)

---

et pessimiste (ajout d'un facteur d'erreur au temps optimiste). Celle-ci évalue le processus en deux phases : la phase de coupe sectionnelle et la phase de caractérisation. Les tableaux 5.3 et 5.4 représentent les résultats de cette analyse. Ces estimations considèrent que les éléments du système ont reçu les corrections nécessaires et que les séquences ont été achevées. Ces estimations tiennent compte des facteurs suivants :

- L'angle d'un filtre est compris entre  $0^\circ$  et  $180^\circ$  ;
- Le temps de la capture d'une image est estimé entre 0.5 et 1.0 seconde ;
- L'analyse se limite à une seule région de la surface ;
- Le temps de déplacements des axes se limite principalement à celui de la séquence de palpation et de mise au point.

En conclusion, pour un C4 d'environ  $80\text{ }\mu\text{m}$  de diamètre, des avances approximatives de  $1.0\text{ }\mu\text{m}$ , 36 analyses métallographiques/section (c.-à-d. 36 piles d'images) de 80 sections chacune, cela prendrait entre 9h (optimiste) à 13h (pessimiste) de production pour obtenir un peu plus de 40 Go de données à haute résolution.

Tableau 5.3 Estimation du temps de la phase de coupe sectionnelle après optimisation

Étape	Temps d'exécution (s)		
	Optimiste	Pessimiste	Facteur d'erreur
Séq. de saisie du porte-échantillon	5	15	3.0
Séq. prépolissage de $3\text{ }\mu\text{m}$	15	45	3.0
Séq. nettoyage	45	90	2.0
Inter. nettoyage et mise en place de la station de préparation	60	120	2.0
Séq. polissage de $0.25\text{ }\mu\text{m}$	60	90	1.5
Séq. nettoyage	45	90	2.0
Séq. placement du porte-échantillon	5	15	3.0
Déplacements robots entre les stations	25	50	2.0
<b>Total (s)</b>	<b>260</b>	<b>515</b>	<b>2.0</b>

Tableau 5.4 Estimation du temps de la phase de caractérisation pour 36 analyses métallographiques différentes après optimisation

Étape	Temps d'exécution (s)		Facteur d'erreur
	Optimiste	Pessimiste	
Séq. de palpé localisé et mise au point automatique	25	45	1.8
Somme des déplacements des filtres polariseurs si les déplacements sont ordonnés de manière optimale	108	120	1.1
Somme des temps de capture d'image	18	36	2.0
<b>Total (s)</b>	<b>151</b>	<b>201</b>	<b>1.3</b>





# CHAPITRE 6

## CONCLUSION

Comme discuté au chapitre 2, il existe actuellement plusieurs approches et outils pour étudier la microstructure des interconnexions d'un semi-conducteur. Cependant, les techniques conventionnelles de métallographie 2D ne suffisent plus. Au cours des dernières décennies, les progrès des méthodes de reconstruction, d'analyses assistées par ordinateur et de simulations numériques ont conduit à des techniques expérimentales pour la caractérisation 3D de métaux. C'est dans un effort et un objectif de produire rapidement une énorme quantité de données sur la microstructure 3D d'un métal que plusieurs systèmes automatisés ont vu le jour.

Dans le cadre de cette maîtrise, les travaux réalisés ont permis de concevoir un système de contrôle sur mesure pour un prototype expérimental de métallographie 3D. L'objectif principal étant d'automatiser un cycle d'analyses métallographiques pratiquant une séquence de coupe sectionnelle, de nettoyage et de caractérisation 2D de surface combinant microscopie en lumière polarisante et mesure de surface. Le projet de recherche a conduit l'analyse, la conception et la fabrication d'un système automatisé intégrant un réseau complexe d'éléments et de sous-systèmes fonctionnels.

La diversité des composants et les contraintes techniques rencontrées du concept original ont dirigé la conception du système automatisé vers une architecture de contrôle distribuée et unique. D'un point de vue interne, ce système réalise plusieurs interfaces de communication personnalisées pour échanger les informations de commande entre les différentes unités de contrôle. La réalisation de l'automatisme a préconisé une approche hautement structurée et modulaire considérant : les analyses fonctionnelles et techniques, l'organisation fonctionnelle méticuleuse du système automatisé ; l'usage de l'approche de conception agile DDD ; l'application de normes et standards de programmation, etc. Le système de contrôle se dit flexible, car un nouveau développeur peut aisément poursuivre le travail et ajouter de nouveaux composants, de nouvelles fonctionnalités ou même de nouveaux sous-systèmes au système de contrôle actuel. Par exemple, les applications PLC et PC possèdent plusieurs interfaces génériques, telles que vues au chapitre 4, offrant la possibilité au développeur d'intégrer de nouveaux composants au système existant. En suivant la même structure et les interfaces logicielles que les autres modules, le nouvel élément sans trop d'effort au *Metallograph Cockpit*. Ensuite, la simple machine à états et les deux

modes d'opération proposés pour le système couvrent toutes les spécifications techniques du processus métallographique. Le système automatisé se dit également sécuritaire, car celui-ci réalise plusieurs couches logiques de sécurité dont les plus importantes respectent les normes et standards industriels de catégorie 4 en matière de sécurité machine.

À son état final, l'application de commandes du Métallographe 3D offre à un utilisateur plusieurs fonctionnalités de pilotage de haut niveau telles que présentées à l'annexe G. Par exemple, celle-ci permet : de piloter individuellement chacun des composants fonctionnels ; d'observer l'état des modules et sous-systèmes, des communications et des opérations ; de réinitialiser et d'activer automatiquement les différents modules, tout cela en quelques clics de boutons. De plus, l'application de contrôle centralise et possède plusieurs interfaces utilisateurs permettant d'assister un opérateur dans les étapes préparatoires de la caractérisation d'un échantillon. Par exemple, elle permet de charger et modifier des paramètres du processus métallographique et de visualiser et extraire en temps réel des données durant une séance. Enfin, la version finale du système fournit, en mode manuel, cinq séquences expérimentales décomposant les étapes d'un cycle d'analyses métallographiques : prise et dépôt du porte-échantillon, caractérisation 2D, sablage, polissage et nettoyage. Quoique ces séquences sont techniquement opérationnelles et automatisées, elles n'atteignent pas le degré d'automatisme visé en termes de reproductibilité ou de spécificité.

À titre d'exemple, la sous-séquence de mise au point automatique pour la caractérisation 2D n'arrive pas toujours à obtenir des images nettes à tout coup. Il faut calibrer et ajuster périodiquement la position relative entre la pointe du palpeur (Z-TIP) et le plan focal (OBJ-F) pour chaque nouvelle séance comme mentionné à la procédure H.1.5. De plus, un des filtres polarisants déplace la région d'inspection, ce qui fait en sorte que les piles d'images se trouvent décalées. À l'exception du dernier point, en mode manuel, l'opérateur peut aisément répéter la procédure ou bien modifier les paramètres en cas d'échec.

Ensuite, les tests préliminaires avec les séquences de polissage n'ont pas démontré qu'il était possible d'effectuer des avances inférieures à 1  $\mu\text{m}$ . Par contre, il a été possible d'effectuer des avances entre 2.5 et 6.0  $\mu\text{m}$  avec un polissage de 3  $\mu\text{m}$  pour un temps de contact de 30 secondes. Il a également été possible d'obtenir à l'aide de la séquence de polissage automatisée des finis de surface suffisamment plane et nette pour la polarisation croisée avec un polissage 0.25  $\mu\text{m}$  à la suite d'un polissage de 3  $\mu\text{m}$ . À ce stade-ci, il serait intéressant de tenter des expériences avec un abrasif liquide de 1  $\mu\text{m}$  pour vérifier s'il est possible d'effectuer des avances inférieures ou égales à 1  $\mu\text{m}$ . Il serait d'autant plus pertinent d'améliorer le débit des pompes péristaltiques afin d'avoir un meilleur contrôle de la distribution des liquides sur le drap lors du polissage.

---

La séquence logique de nettoyage proposée par le système fonctionne, mais elle ne réussit pas à obtenir des résultats constants. Des tests supplémentaires sont nécessaires afin de déterminer la direction et la hauteur optimales des jets d'eau et d'air. De plus, il a été impossible de réaliser une séquence de savonnage avec le montage et concept actuel. Avec la version finale de la séquence de nettoyage, l'équipement a tout de même réussi à obtenir des échantillons suffisamment propres pour la caractérisation. Malgré quelques échecs, il suffisait de répéter la séquence pour obtenir un résultat satisfaisant. Des expérimentations supplémentaires seraient intéressantes afin de déterminer les temps de rinçage et de séchage qui offrent de meilleurs et constants résultats.

En somme, le projet n'a pas réussi à automatiser complètement les séquences d'un cycle métallographique avec l'équipement final. Il a cependant réussi à concevoir un automatisme capable d'opérer l'intégralité des composants fonctionnels de l'équipement et à automatiser les nombreuses opérations nécessaires pour matérialiser les séquences du cycle d'analyses métallographiques. Les diverses expériences pratiquées avec le système automatisé ont permis d'identifier plusieurs facteurs limitants et d'acquérir des données préliminaires. À ce stade-ci du projet, il est impossible d'affirmer ou d'infirmer que l'équipement est capable d'atteindre toutes les spécifications souhaitées. Avec l'application de contrôle finale, il a été faisable de pratiquer une séance de métallographie partielle et semi-automatisée. Même si les résultats de cette séance, présentés à la section 5.5, n'atteignent pas la résolution de coupe escomptée, l'expérience démontre que l'équipement est près de l'objectif étant donné qu'il y a encore plusieurs possibilités d'amélioration et d'optimisation de paramètres, sans avoir à changer le design ou les séquences actuelles.

Finalement, l'automatisme du Métallographe 3D n'est pas complet mais il est suffisamment avancé et opérationnel pour aider les chercheurs dans leurs expériences ou activités de recherche dans un domaine connexe. L'état final du Métallographe 3D ouvre la porte à plusieurs autres projets de recherche pour : optimiser les séquences du cycle métallographique ; produire des données 3D de divers échantillons ; développer une procédure ou un logiciel adapté pour créer des modèles 3D ; etc. Il serait très pertinent de finaliser les séquences du cycle d'analyses métallographiques pour être en mesure d'effectuer un cycle complet automatiquement selon les spécifications visées. Ensuite, il ne resterait qu'à valider s'il est réellement possible d'extraire des caractéristiques 3D, telles que l'orientation et les dimensions des grains, présents dans un C4 sans-plomb. Dans l'affirmative, les données produites par cet équipement seront certainement utiles pour alimenter les bases de données et accélérer le développement des simulateurs d'éléments finis réels. Ces modèles permettront de mieux comprendre l'effet des grains sur les propriétés physiques

des interconnexions sans-plomb rehaussant ainsi la fiabilité des procédés d'assemblage de semi-conducteurs employant ces types d'alliage.

# ANNEXE A

## PROTOTYPE D'ANALYSES MÉTALLOGRAPHIQUES 3D

### A.1 Présentation générale du concept

L'idée derrière le concept du prototype est l'automatisation de la méthode d'analyse métallographique de C4 pratiquée manuellement par les techniciens d'IBM au laboratoire du C2MI. Ordinairement, cette méthode consiste à faire la préparation d'une surface à inspecter en sablant et polissant un échantillon au moyen d'un disque tournant en tissu et d'une solution abrasive à base de microparticules. L'étape suivante comprend le nettoyage de la surface à l'aide d'un savon doux, le rinçage et le séchage. Ensuite, un technicien apporte le spécimen à un système de microscopie optique ou électronique où il est alors possible de l'analyser. Inspirée de cette technique, l'équipement expérimental a comme objectif de reproduire et d'automatiser ces différentes étapes [20]. Initialement, le prototype est subdivisé en plusieurs sous-systèmes fonctionnels : manipulation, préparation de surface, nettoyage, caractérisation 2D, protection et contrôle. La figure A.1 illustre le concept initial de cet équipement. Les figures A.2 et A.3 montrent le montage réel de cet équipement au début et à la fin du projet. Les sections de ce chapitre ont comme but de présenter simplement les éléments fonctionnels de ces sous-systèmes. Il est à noter que la majorité des images du prototype présentées dans cette annexe sont d'une gracieuseté de D. L. Demers [20].

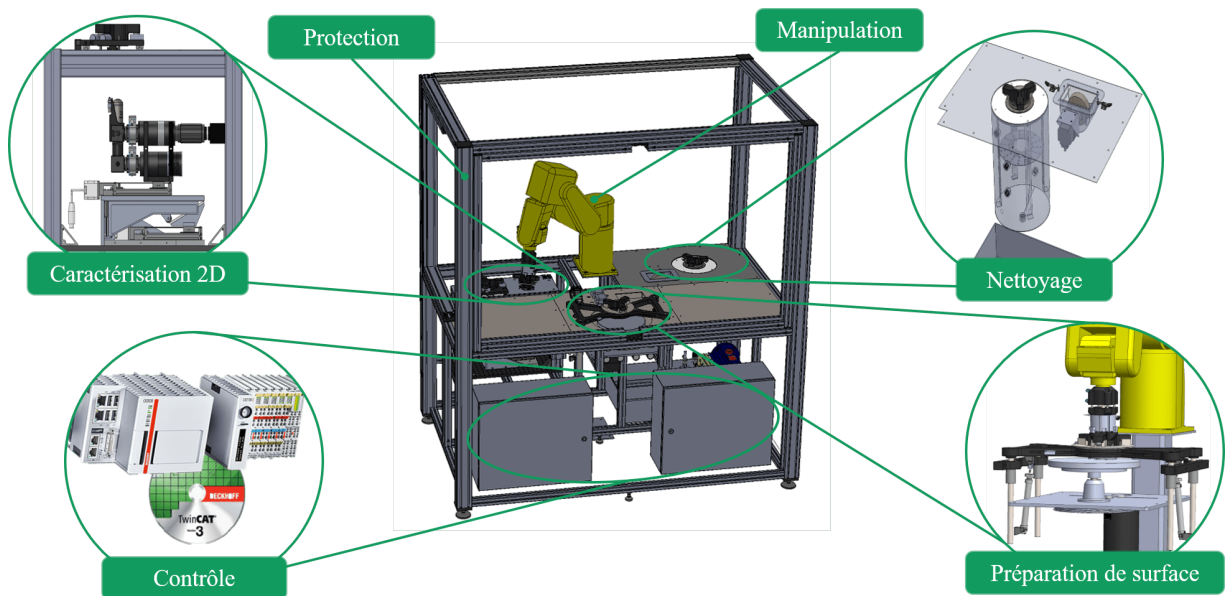


Figure A.1 Concept du prototype expérimental d'analyses métallographiques 3D (Métallographe 3D) [20]



Figure A.2 Prototype expérimental réel en début de projet



Figure A.3 Prototype expérimental réel en fin de projet



## A.2 Échantillon et porte-échantillon

Au début du projet, un accord a été établi que l'échantillon approvisionné à l'équipement était une puce électronique présectionnée et moulée dans un support d'époxy cylindrique de 1.5 pouces de diamètre. La préparation de cet échantillon se fait selon la procédure conventionnelle des techniciens de laboratoire du C2MI. Avec le système final, il est également possible d'utiliser des échantillons de 1.0 et 1.25 pouces de diamètre en insérant un support de serrage personnalisé au porte-échantillon. La figure A.4 montre quelques exemples d'échantillon typiques compatibles avec le système. Une fois l'échantillon préparé, ce dernier s'installe rigidement dans le porte-échantillon. La figure A.5 montre le concept du porte-échantillon alors que la figure A.6 présente le porte-échantillon réel muni d'un échantillon. L'orientation du plan de l'échantillon ou de la puce (plan de coupe) dans l'espace par rapport au plan d'inspection de l'objectif de la caméra n'est pas parfaitement parallèle. Pour cette raison, la conception du porte-échantillon a songé à munir celui-ci d'un système de trois vis micrométriques et d'un croisillon pour ajuster l'orientation du plan de sectionnement.

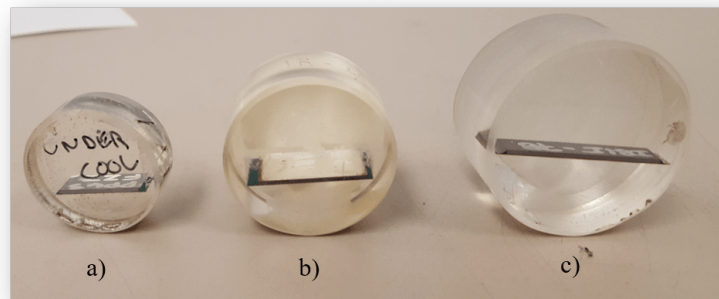


Figure A.4 Exemples d'échantillon de puce électronique dans un support cylindrique en époxy d'un diamètre de : a) 1.0, b) 1.25, c) 1.5 pouces

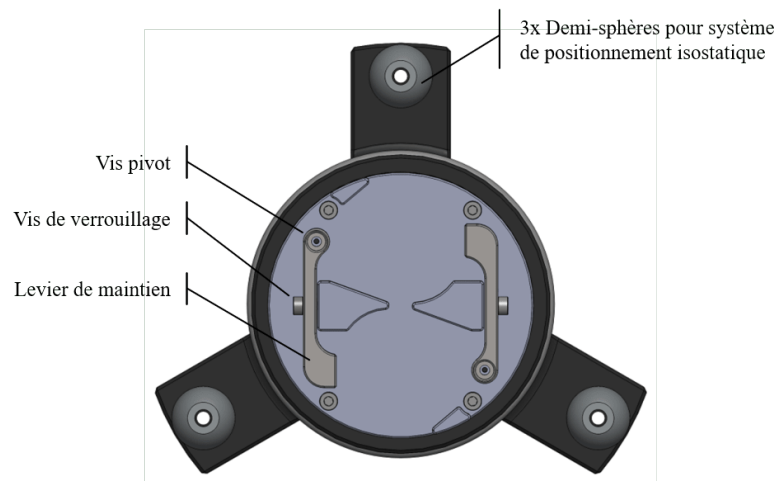


Figure A.5 Concept du porte-échantillon (vue du dessous) [20]

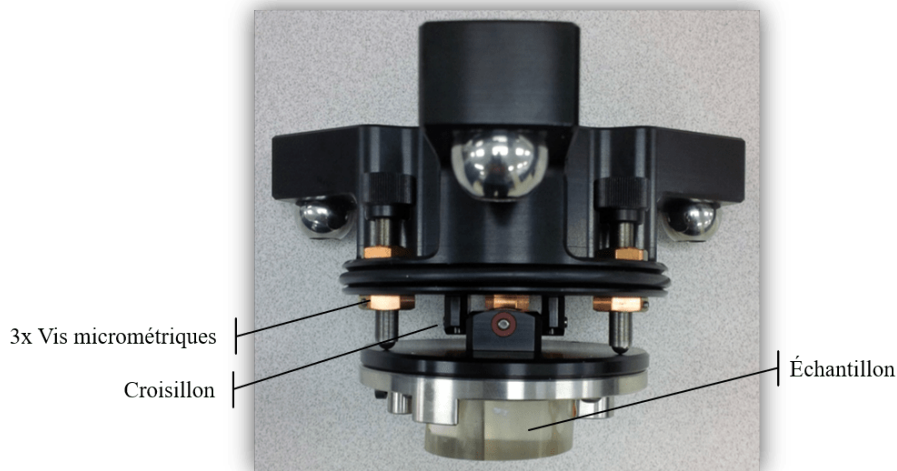


Figure A.6 Porte-échantillon réel avec un échantillon de 1.5 pouces de diamètre

### A.3 Sous-système - Manipulation

Le sous-système de manipulation est responsable du déplacement et du maniement de l'échantillon d'une station à une autre. Il a également un rôle important lors des séquences de préparation de surface et de nettoyage. Ce sous-système comprend le bras articulé à six axes de la compagnie FANUC (un généreux don de GE Aviation Bromont), la pince pneumatique de compression et le porte-échantillon. Cet ensemble est apparent à la figure A.7. Le bras manipulateur est un système indépendant de l'équipement et est géré par le contrôleur R-J3 de FANUC, situé à l'extérieur de la structure principale.

### A.4 Sous-système - Préparation de surface

La station de préparation de surface est responsable du « sectionnement » du plan de l'échantillon. Ce dernier a la capacité de sabler (prépolir) ou polir l'échantillon selon une force de contact, une vitesse et une rotation préréglées. La figure A.7 illustre les différents composants fonctionnels de cette station. Essentiellement, ce sous-système comprend un système mécanique passif de contre-pression et une table rotative motorisée. L'assemblage de contre-pression avec le système de coussin d'air de la pince pneumatique cherche à compenser l'insuffisance de précision du bras manipulateur lors du polissage submicronique. Le concept est que, lors du polissage, le bras robotisé appuie et pousse le porte-échantillon sur le support mobile tandis que le système de compression se charge d'appliquer une force constante entre l'échantillon et la table rotative. Lors du polissage, des pompes péristaltiques fournissent un apport en lubrifiant et abrasif sur le plateau de polissage tandis que celui-ci est entraîné par un système de poulie et un moteur. De plus, le concept mentionne qu'à l'instant où l'échantillon entre en contact avec la table tournante, le dernier joint du robot effectue des rotations à contresens (normal à la rotation de la table) selon une vitesse donnée afin d'obtenir un fini de surface plus uniforme et plane [20].



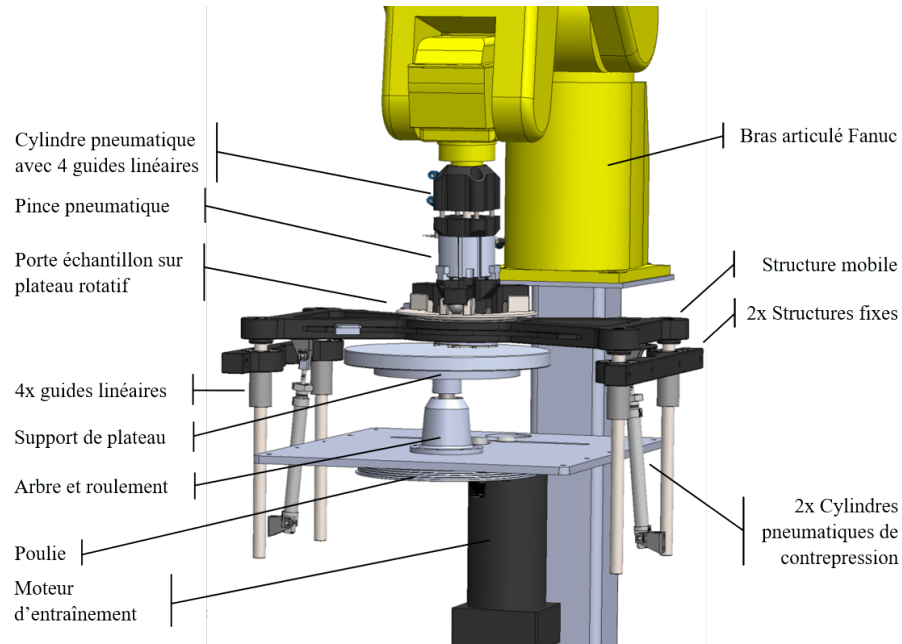


Figure A.7 Concept du sous-système de préparation de surface [20]

## A.5 Sous-système - Nettoyage

Cette station sert à nettoyer l'échantillon après une séquence de préparation de surface. Brièvement, la station de nettoyage compte deux sous-stations : une de savonnage, et une de rinçage et de séchage. La figure A.8 présente les différents éléments fonctionnels de ce sous-système. En résumé, la station de savonnage est munie d'une brosse douce, qui est entraînée par un moteur à faible vitesse par un accouplement magnétique, baignant dans une solution savonneuse. À la suite du savonnage, le système de manipulation déplace l'échantillon vers la cuve de rinçage où des jets d'eau et d'air sont activés en alternance en direction de l'échantillon pour retirer les résidus et liquides en surface.

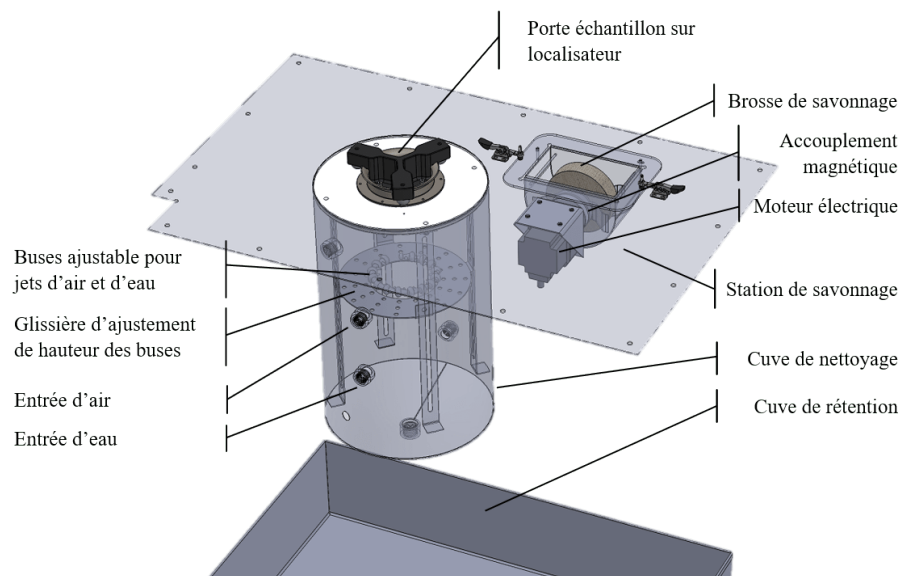


Figure A.8 Concept du sous-système de nettoyage [20]

## A.6 Sous-système - Caractérisation

La station de caractérisation est le sous-système le plus complexe et le plus important du système. Ce sous-système s'occupe de caractériser une ou plusieurs régions d'intérêt à la surface de l'échantillon au moyen d'un microscope optique à lumière polarisante et de mesures de surface localisées (près de la région inspectée) selon un ensemble de paramètres donné. La figure A.9 donne une vue d'ensemble de ce sous-système. Celui-ci comprend deux sous-assemblages. Le premier consiste en la plaque mobile pour le positionnement isostatique du porte-échantillon et le deuxième est le système de microscopie motorisée pour effectuer la caractérisation automatisée. Les sections suivantes présentent ces deux sous-assemblages.

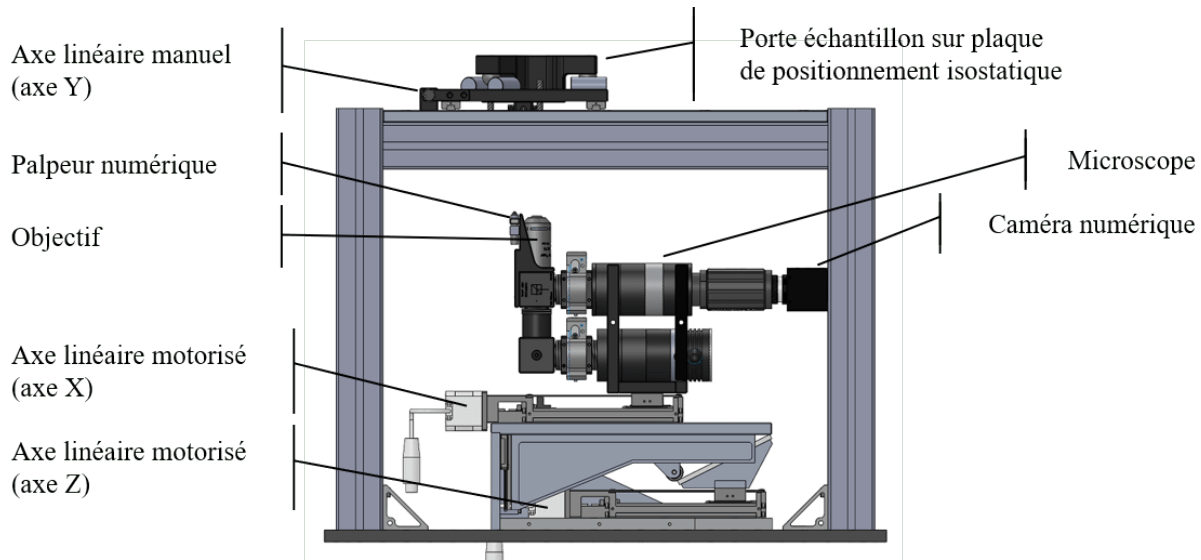


Figure A.9 Concept du sous-système de caractérisation (vue de côté) [20]

### A.6.1 Plaque mobile avec positionnement isostatique

La plaque mobile sert principalement à ajuster manuellement, à l'aide de vis micrométriques, la position de l'échantillon par rapport à l'axe Y du système de référence de la station de caractérisation. La figure A.10 illustre le concept de cette plaque. Ce plateau contient six cylindres installés en paire parallèle réparties à  $120^\circ$  autour d'une ouverture circulaire. La combinaison de ces cylindres avec les demi-sphères du porte-échantillon forme un système isostatique. Ce concept est très important puisque l'échantillon doit retourner précisément à la même position à la suite des séquences de polissage et nettoyage afin de suivre avec précision (en deçà du micron) la position relative du plan de l'échantillon par rapport aux instruments de caractérisation (objectif et palpeur). À la suite de tests expérimentaux, ce sous-système de repositionnement isostatique démontrait une répétabilité de positionnement nanométrique ( $\sim 33$  nm) [20].

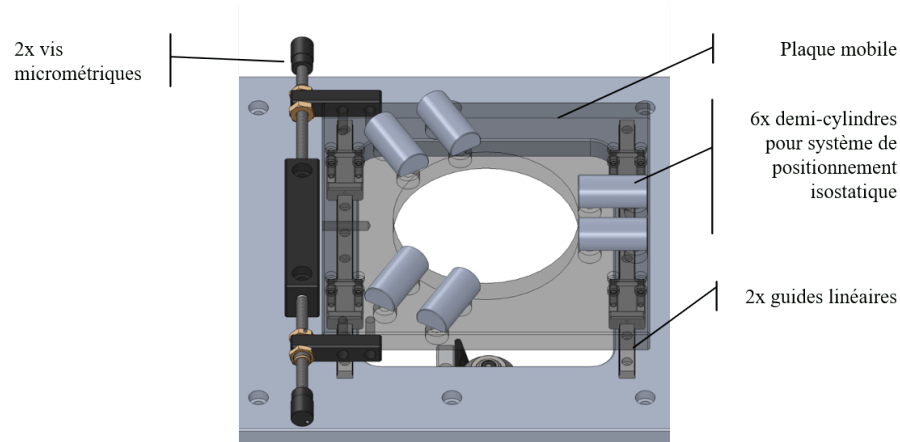


Figure A.10 Concept de la plaque mobile avec positionnement isostatique [20]

### A.6.2 Système de microscopie motorisée

Le système de caractérisation est muni d'un microscope motorisé. Cet assemblage inclut plusieurs éléments tels que montrés à la figure A.9. Dans une optique de simplicité, les trois axes linéaires du système de caractérisation forment le système de coordonnées cartésiennes à trois dimensions. Les axes linéaires motorisés représentent les axes X et Z tandis que le guide linéaire du plateau mobile représente l'axe Y. La figure A.11 montre la partie motorisée du système de caractérisation alors que la figure A.12 présente le sous-assemblage du microscope. La figure A.12 donne une vue rapprochée du support de l'objectif et du palpeur du microscope, les deux effecteurs du système de caractérisation.

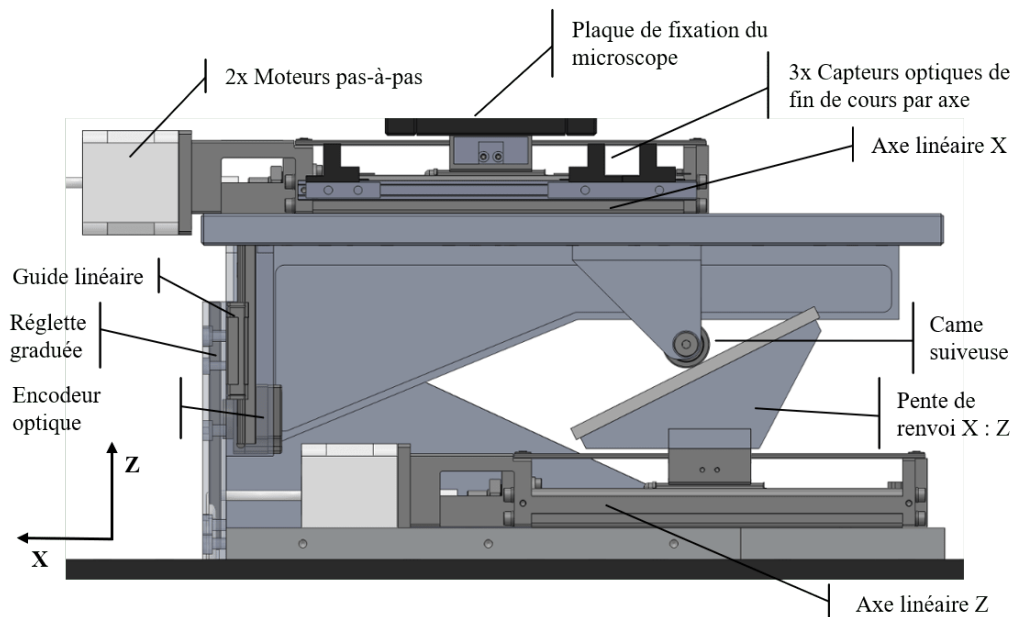


Figure A.11 Concept du système de microscopie motorisée [20]

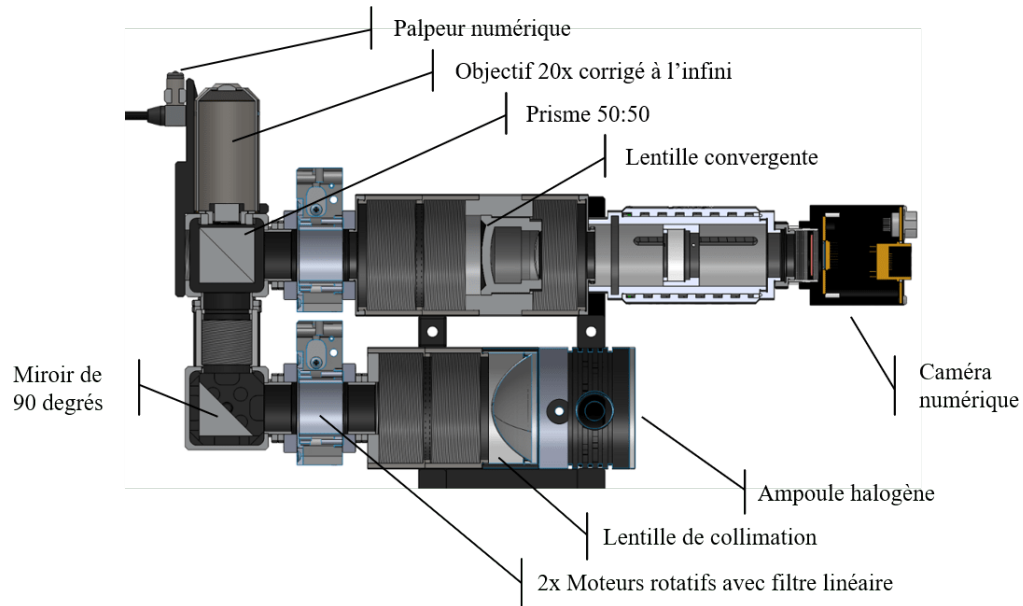


Figure A.12 Concept du microscope optique à lumière polarisante [20]

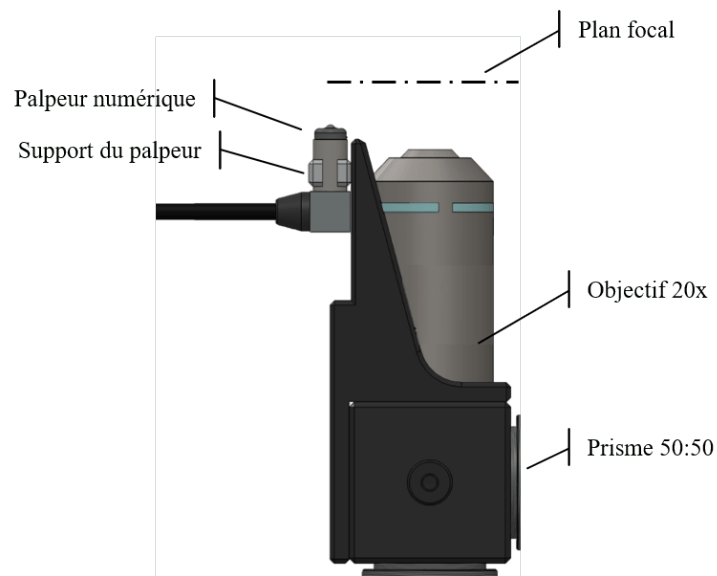


Figure A.13 Plan rapproché de l'objectif et du palpeur numérique du microscope [20]

## A.7 Sous-système - Protection

Le sous-système protection est responsable de la santé et sécurité du personnel, de l'équipement et de l'environnement en interaction avec le système. Il englobe tous les dispositifs de protection, de sécurité ou de support tels que les structures physiques de la machine, les composants électromécaniques, etc. Le chapitre 3.4.3 de ce mémoire discute des différents éléments et fonctions de ce sous-système et, pour cette raison, cette section-ci ne donne pas plus d'informations à son propos.

## A.8 Sous-système - Contrôle

En dernier point, le dernier sous-système du concept initial est celui de contrôle. Ce sous-système est responsable de la conduite et de la gestion des cycles et des séquences d'opération de l'équipement. Il contrôle et possède l'information sur l'ensemble des sous-systèmes. L'unité centrale de ce sous-système est un ordinateur embarqué de la compagnie Beckhoff. Les ordinateurs industriels Beckhoff permettent l'intégration de plusieurs modules (p. ex. logiciels, cartes d'entrées/sorties, bus de terrain, différents ports de connexion, modules externes, etc.). Les options que ces automates possèdent sont innombrables, ce qui fait d'eux d'excellents atouts pour le développement de systèmes automatisés. La figure A.14 montre la composition de base d'un tel ordinateur. Le type d'ordinateur embarqué utilisé pour l'automatisation du prototype d'analyses métallographiques 3D est le CX2030-0120. Pour résumé, celui-ci se compose d'un processeur à doubles cœurs Intel® Core™ (CPU) de 1.5 GHz, d'un système d'exploitation *Windows Embedded Standard 7 P* (32-bit) et d'un logiciel de contrôle temps réel TwinCAT 3 XAR (*eXtended Automation Runtime*). Les capacités et technologies de cet automate centralisent la base de l'automatisme de l'équipement métallographique présenté dans ce mémoire.

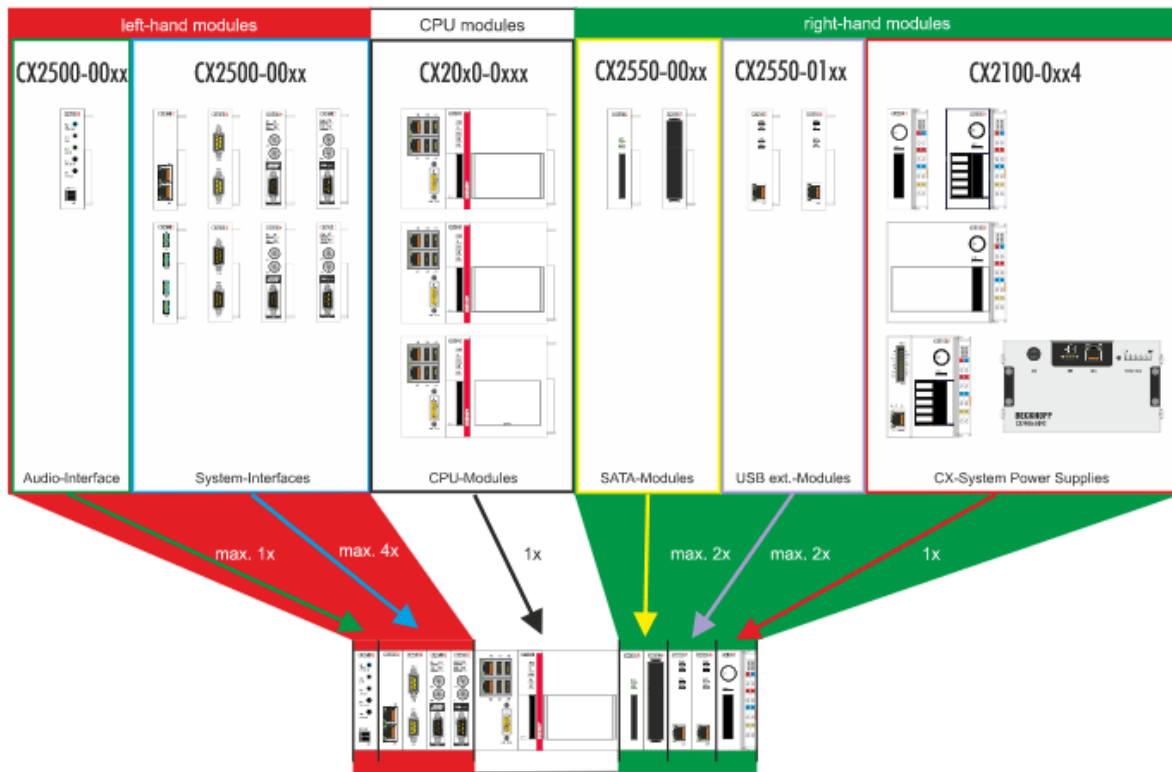


Figure A.14 Vue d'ensemble de la famille de produits CX2000 avec CPU, unité d'alimentation et modules de base [50]

# ANNEXE B

## DOCUMENT GEMMA

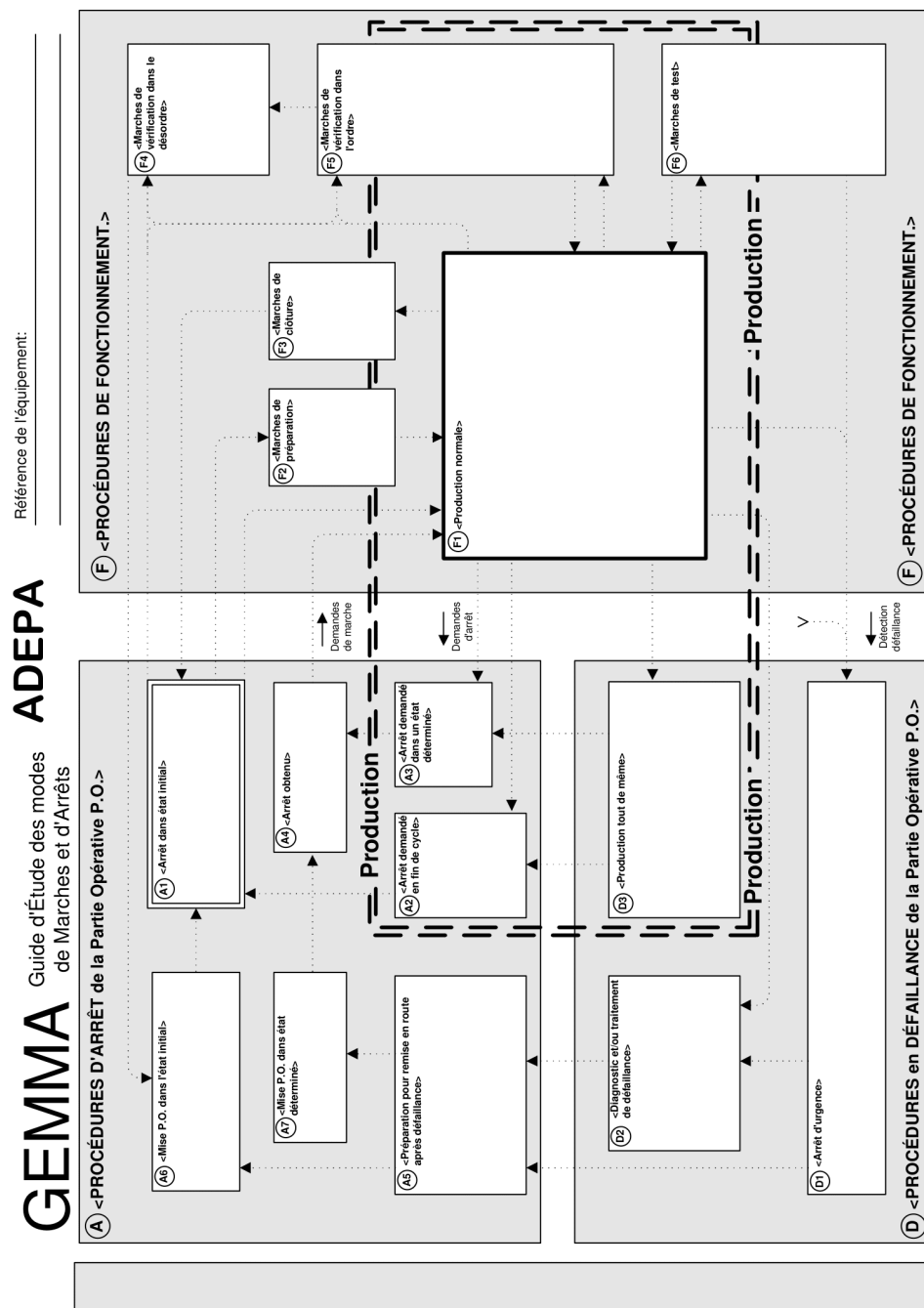


Figure B.1 Document graphique GEMMA





# ANNEXE C

## CLASSIFICATION DES COMPOSANTS FONCTIONNELS

Cette annexe dresse la liste des composants fonctionnels du Métallographe 3D sous la forme de deux tableaux C.1 et C.2. Cette liste identifie et classe chacun de ces éléments. Elle représente l'ensemble des composants fonctionnels gérés par les unités logiques du système métallographique.

Table C.1 Liste des composants fonctionnels du Métallographe 3D (1 de 2)

N°	REPÈRE	MANUFACTURIER	NUMÉRO DE PIÈCE	DESCRIPTION
1	C1-A	SCHNEIDER	LC1D25BL	CONTACTOR, 25 AMP, 3 POLES, 24VDC LOW CONSUMPTION
2	C1-B	SCHNEIDER	LC1D25BL	CONTACTOR, 25 AMP, 3 POLES, 24VDC LOW CONSUMPTION
3	C2	SCHNEIDER	LC1D09BL	CONTACTOR, 9 AMP, 3 POLES, 24VDC LOW CONSUMPTION
4	CAM-1	IDS	UI-6280SE-C-HQ	DIGITAL CAMERA, SENSOR TECH. CCD, RES. 2448 X 2048, 5 MP, 8.5 FPS MAX, PIXEL SIZE 3.45 UM, COLOR DEPTH 12 BIT
5	CB-1	SCHNEIDER	60120	MINIATURE CIRCUIT-BREAKER, 1 POLE, 2A, D CURVE, UL489
6	CB-2	SCHNEIDER	60123	MINIATURE CIRCUIT-BREAKER, 1 POLE, 5A, D CURVE, UL489
7	CB-3	SCHNEIDER	60128	MINIATURE CIRCUIT-BREAKER, 1 POLE, 13A, D CURVE, UL489
8	CB-4	SCHNEIDER	60110	MINIATURE CIRCUIT-BREAKER, 1 POLE, 10A, C CURVE, UL489
9	CB-5	SCHNEIDER	60158	MINIATURE CIRCUIT-BREAKER, 2 POLES, 6A, D CURVE, UL489
10	CEMO-A	SCHNEIDER	LC1D25BL	CONTACTOR, 25 AMP, 3 POLES, 24VDC LOW CONSUMPTION
11	CEMO-B	SCHNEIDER	LC1D25BL	CONTACTOR, 25 AMP, 3 POLES, 24VDC LOW CONSUMPTION
12	CEP	OMRON	EE-SX670P	PHOTOMICROSENSOR, SLOT-TYPE STD, DARK-ON / LIGHT-ON
13	CR1	OMRON	G7SA-4A2B DC24	SAFETY RELAY, 6PST-4NO/2NC, 24VDC COIL
14	CR2	ALLEN BRADLEY	700-HLT1Z24	TERMINAL BLOCK RELAY, SPDT, 24VDC
15	CR3	ALLEN BRADLEY	700-HLT1Z24	TERMINAL BLOCK RELAY, SPDT, 24VDC
16	DISC-1	ALLEN BRADLEY	194E-E32-1753-6N	DISCONNECT SWITCH, 3P, 2-POS, 32A, 690 VAC, RED/YELLOW KNOB
17	DRV-1	LENZE	ESVD534-E	DRIVE, 0-180VDC, INPUT 100-265VAC
18	DRV-2	ORIENTAL MOTOR	AXHD30K	DRIVE, BRUSHLESS DC MOTOR, 24VDC
19	DRV-X	BECKHOFF	EP7041-3002	ETHERCAT BOX, STEPPER MOTOR MODULE, 8..48VDC
20	DRV-Z	BECKHOFF	EP7041-3002	ETHERCAT BOX, STEPPER MOTOR MODULE, 8..48VDC
21	DV-1	SMC	NAV2000-N02-5DZ	SOFT START-UP VALVE, 1/4NPT
22	DV-2	SMC	NAV2000-N02-5DZ	SOFT START-UP VALVE, 1/4NPT
23	EMO1	ALLEN BRADLEY	800FM-MT44	EMERGENCY STOP, TWIST TO RELEASE, 40MM METAL
24	EMO2	ALLEN BRADLEY	800FM-MT44	EMERGENCY STOP, TWIST TO RELEASE, 40MM METAL
25	EMO3	ALLEN BRADLEY	800FM-MT44	EMERGENCY STOP, TWIST TO RELEASE, 40MM METAL
26	ENC-Z	HEIDENHAIN	LIP 481 A	LINEAR ENCODOR, 5VDC, 190MA
27	FC-1A	SMC	AS1002F-03A	FLOW CONTROL, SPEED CONTROLLER, ONE TOUCH, DIA 5/32"
28	FC-1B	SMC	AS1002F-03A	FLOW CONTROL, SPEED CONTROLLER, ONE TOUCH, DIA 5/32"
29	FC-2A	SMC	AS1002F-03A	FLOW CONTROL, SPEED CONTROLLER, ONE TOUCH, DIA 5/32"

⋮

⋮

N°	REPÈRE	MANUFACTURIER	NUMÉRO DE PIÈCE	DESCRIPTION
30	FC-2A	SMC	AS1002F-03A	FLOW CONTROL, SPEED CONTROLLER, ONE TOUCH, DIA 5/32"
31	FS-1	CYNERGY3	RSF16Y100RF	LIQUID SENSOR LEVEL SWITCH, SPST-NC, 120VDC MAX
32	FS-2	CYNERGY3	RSF16Y100RF	LIQUID SENSOR LEVEL SWITCH, SPST-NC, 120VDC MAX
33	GR-C	SMC	D-M9PAZ	AUTOSWITCH PNP, WATER RESISTANT, W/INDICATOR LIGHT
34	GR-O	SMC	D-M9PAZ	AUTOSWITCH PNP, WATER RESISTANT, W/INDICATOR LIGHT
35	HX	OMRON	EE-SX674P	PHOTOMICROSENSOR, SLOT-TYPE, DARK-ON / LIGHT-ON
36	HZ	OMRON	EE-SX674P	PHOTOMICROSENSOR, SLOT-TYPE, DARK-ON / LIGHT-ON
37	KS-1	ALLEN BRADLEY	800FM-KM21	KEYED SELECTOR SWITCH, 2 POSITIONS, METAL
38	LAMP-1	THORLABS	QTH10/M	QUARTZ TUNGSTEN-HALOGEN LAMP, 2800K TEMP, 12VDC
39	LR-MATE	FANUC	LR-MATE 200i	FANUC SIX-AXIS ROBOT, 3 KG PAYLOAD, 700MM MAX REACH, ±0.04MM REPEATABILITY
40	LT-1	ALLEN BRADLEY	800F-BN3W	INTEGRATED LED BASE MOUNT, 24VAC/DC, WHITE LED
41	LT-2	PHOENIX CONTACT	2700127	CLEAR LED MODULE 70MM 24VAC/DC, LED
42	LT-3	PHOENIX CONTACT	2700119	GREEN LED MODULE, 70MM 24VAC/DC, LED
43	LT-4	BANNER	T30GRXPQ EZ-LIGHT	2-COLOR INDICATOR, 18-30VDC PNP, 4-PIN
44	LXN	OMRON	EE-SX674P	PHOTOMICROSENSOR, SLOT-TYPE, DARK-ON / LIGHT-ON
45	LXP	OMRON	EE-SX674P	PHOTOMICROSENSOR, SLOT-TYPE, DARK-ON / LIGHT-ON
46	LZN	OMRON	EE-SX674P	PHOTOMICROSENSOR, SLOT-TYPE, DARK-ON / LIGHT-ON
47	LZP	OMRON	EE-SX674P	PHOTOMICROSENSOR, SLOT-TYPE, DARK-ON / LIGHT-ON
48	MAN-CYL-1	FESTO	ADN-20-10-A-P-A	COMPACT PNEUMATIC CYLINDER, 20 MM PISTON DIA., 10 MM VARIABLE STROKE
49	MAN-GRP	SMC	MHS3-50D-M9PAZ	3-FINGERS PARALLEL STYLE AIR GRIPPER, 50 MM DIA. BORE SIZE
50	MOD1	BECKHOFF	EL5021	ENCODER SINCOS INTERFACE, 5VDC, 1VPP
51	MOD2	BECKHOFF	EL1809	16 DIGITAL INPUT CHANNELS, 24VDC
52	MOD3	BECKHOFF	EL2809	16 DIGITAL OUTPUT CHANNELS, 24VDC
53	MOD4	BECKHOFF	EL4004	4-CHANNEL ANALOG OUTPUT 0...+10V, 12 BITS
54	MOD5	BECKHOFF	EL7332	2-CHANNEL DC MOTOR OUTPUT, 24VDC 1A
55	MOD6	BECKHOFF	KL3312	2-CHANNEL THERMOCOUPLE INPUT
56	MOD7	BECKHOFF	EK1110	ETHERCAT EXTENSION
57	MOT-X	BECKHOFF	AS1010-0000	STEPPER MOTOR NEMA17, 24-50VDC
58	MOT-Z	BECKHOFF	AS1010-0000	STEPPER MOTOR NEMA17, 24-50VDC
59	MTR-1	LENZE	13.120.65.120	PERMANENT MAGNET MOTOR, 90VDC, 370W
60	MTR-2	ORIENTAL MOTOR	AXHM230KC-GFH	BRUSHLESS DC MOTOR, 30W
61	MTR-2	ORIENTAL MOTOR	GFH2G15	GEARHEAD PARALLEL SHAFT 15:1
62	MTR-3	WATSON MARLOW	114FDC	STANDARD DRIVE PUMP, 24-30VDC, 30 RPM
63	MTR-4	WATSON MARLOW	114FDC	STANDARD DRIVE PUMP, 24-30VDC, 30 RPM
64	MV-1	APOLLO VALVES	70-142-27 3/8"	BRONZE BALL VALVE W/LOCKING LEVER, 3/8FNPT
65	ORBIT-USB	SOLARTRON METROLOGY LTD.	911427-3	ORBIT-3 USB
66	PA-1	CUI INC	EMSA120150-P5P-SZ	AC/DC ADAPTER, IN 100-240 VAC 50-60Hz, OUT 12 VDC 1.5A, 18W
67	PA-2	TRIAD	WSU120-1500	AC/DC ADAPTER, IN 100-240 VAC 50-60Hz, OUT 12 VDC 1.5A, 18W
68	PA-3	JENTEC TECHNOLOGY CO., LTD.	CF1805-B	AC/DC ADAPTER, IN 100-240 VAC 50-60Hz, OUT 5 VDC 3A, 15W
69	PA-4	LEI	MU05BS050100-A1	AC/DC ADAPTER, IN 100-240 VAC 50-60Hz, OUT 5 VDC 1A, 5W
70	PB-1	ALLEN BRADLEY	800F-BX10	BLOC CONTACT 1NO BASE MOUNT
71	PB-2	ALLEN BRADLEY	800F-BX10	BLOC CONTACT 1NO BASE MOUNT

⋮

:

N°	REPÈRE	MANUFACTURIER	NUMÉRO DE PIÈCE	DESCRIPTION
72	PB-3	ALLEN BRADLEY	800F-BX01	BLOC CONTACT 1NC BASE MOUNT
73	PB-4	ALLEN BRADLEY	800F-BX01	BLOC CONTACT 1NC BASE MOUNT
74	PB-5	ALLEN BRADLEY	800F-BX01	BLOC CONTACT 1NC BASE MOUNT
75	PLC	BECKHOFF	CX2030-0120	CPU MODULE, DUAL CORE 1.5GHZ, WINDOWS EMBEDDED STANDARD 7
76	POL-CYL-1	FESTO	DSNU-16-100-P-A	PNEUMATIC CYLINDER, 16 MM PISTON DIA., 100 MM VARIABLE STROKE
77	POL-CYL-2	FESTO	DSNU-16-100-P-A	PNEUMATIC CYLINDER, 16 MM PISTON DIA., 100 MM VARIABLE STROKE
78	PR-1	SMC	AR20K-N02BE-Z-B	PRESSURE REGULATOR 7 TO 123 PSI, WNUT & GAUGE IN PSI
79	PR-2	SMC	AR20K-N02BE-Z-B	PRESSURE REGULATOR 7 TO 123 PSI, WNUT & GAUGE IN PSI
80	PR-3	SMC	AR20K-N02BE-Z-B	PRESSURE REGULATOR 7 TO 123 PSI, WNUT & GAUGE IN PSI
81	PR-4	SMC	AR20K-N02BE-Z-B	PRESSURE REGULATOR 7 TO 123 PSI, WNUT & GAUGE IN PSI
82	PRS4	OMRON	E2S-W25-1M	SUPER COMPACT PROXIMITY SENSOR, 24VDC
83	PS-1	SMC	ISE40-M5-62L	PRESSURE SWITCH
84	PSU-0	BECKOFF	CX2100-0004	POWER SUPPLY 24 VDC 45W
85	PSU-1	OMRON	S8VK-G24024	POWER SUPPLY 24VDC 240W
86	RECP-1	WEIDMULLER	6720005421	DIN-RAIL RECEPTACLE, 15 AMP DUPLEX
87	RECP-2	N/A	N/A	POWER SUPPLY BAR
88	RFID-1	IDEM SAFETY	404002	RFID-CODED SAFETY SWITCH 2NO/1AUX NO
89	RFID-2	IDEM SAFETY	404002	RFID-CODED SAFETY SWITCH 2NO/1AUX NO
90	RFID-3	IDEM SAFETY	404002	RFID-CODED SAFETY SWITCH 2NO/1AUX NO
91	RFID-4	IDEM SAFETY	404002	RFID-CODED SAFETY SWITCH 2NO/1AUX NO
92	RJ3-OP	FANUC	N/A	R-J3 OPERATOR BOX
93	RJ3-CTRL	FANUC	N/A	R-J3 CONTROLLER (A-CABINET)
94	RJ3-TP	FANUC	N/A	MULTI-PURPOSE TEACH PENDANT (ROBOT PROGRAMMING INTERFACE)
95	RS232-1	BECKHOFF	CX2500-0030	RS232 INTERFACE 2-PORT
96	SLT	BECKHOFF	EL6900	TWINSAFE LOGIC TERMINAL
97	SMOD1	BECKHOFF	EL1904	4-CHANNEL DIGITAL INPUT TERMINAL, TWINSAFE, 24 VDC
98	SMOD2	BECKHOFF	EL1904	4-CHANNEL DIGITAL INPUT TERMINAL, TWINSAFE, 24 VDC
99	SMOD3	BECKHOFF	EL1904	4-CHANNEL DIGITAL INPUT TERMINAL, TWINSAFE, 24 VDC
100	SMOD4	BECKHOFF	EL1904	4-CHANNEL DIGITAL INPUT TERMINAL, TWINSAFE, 24 VDC
101	SMOD5	BECKHOFF	EL2904	4-CHANNEL DIGITAL OUPUT TERMINAL, TWINSAFE, 24 VDC
102	SMRM-1	THORLABS	K10CR1/M	STEPPER MOTOR ROTATION MOUNT W/INTEGRATED CONTROLLER
103	SMRM-2	THORLABS	K10CR1/M	STEPPER MOTOR ROTATION MOUNT W/INTEGRATED CONTROLLER
104	SV-1	SMC	SY3120-5LOZ-C4	VALVE 5/2 BODY PORTED
105	SV-2	SMC	SY3120-5LOZ-C4	VALVE 5/2 BODY PORTED
106	SV-3	SMC	N/A	INTEGRATED VALVE IN FANUC ROBOT ARM
107	SV-4	SMC	N/A	INTEGRATED VALVE IN FANUC ROBOT ARM
108	SW-ETH	D-LINK	DGS-1005G	5-PORT GIGABIT DESKTOP SWITCH
109	SW-USB	J5CREATE	JUH340	USB 3.0 4-PORT HUB
110	THL	OMRON	EE-SX672P	PHOTOMICROSENSOR, SLOT-TYPE, T-SHAPED, DARK-ON / LIGHT-ON
111	THR	OMRON	EE-SX672P	PHOTOMICROSENSOR, SLOT-TYPE, T-SHAPED, DARK-ON / LIGHT-ON
112	TS-1	OMRON	D4DS-NK5	DOOR SWITCH ACTUATOR
113	TS-1	OMRON	D4SL-N3GFG-D4	GUARD LOCK SAFETY DOOR SWITCH WITH INDICATOR
114	TS-2	OMRON	D4DS-NK5	DOOR SWITCH ACTUATOR
115	TS-2	OMRON	D4SL-N3GFG-D4	GUARD LOCK SAFETY DOOR SWITCH WITH INDICATOR

:

⋮

N°	REPÈRE	MANUFACTURIER	NUMÉRO DE PIÈCE	DESCRIPTION
116	TS-3	OMRON	D4DS-NK5	DOOR SWITCH ACTUATOR
117	TS-3	OMRON	D4SL-N3GFG-D4	GUARD LOCK SAFETY DOOR SWITCH WITH INDICATOR
118	USB-1	BECKHOFF	CX2500-0070	USB INTERFACE 4-PORT USB 3.0 TYPE A
119	WB200	WINLAND ELECTRONICS	WB200	ELECTRONIC WATER DETECTION DEVICE
120	WD1	WINDLAND ELECTRONICS	W-S-U	WATER SENSOR SURFACE UNSUPERVISED
121	WPC	N/A	N/A	WINDOWS COMMAND COMPUTER, DESKTOP OR LAPTOP
122	WPR-1	PARKER	R24-02BK	PRESSURE REGULATOR, 1/4NPT 0.60PSI (1/8NPT GAUGE PORT)
123	WPR-1	DWYER	UGJ-C10441N	PRESSURE GAUGE, 52MM 0-60PSI 1/8NPT, BACK CONNECT
124	WPR-2	PARKER	R24-02BK	PRESSURE REGULATOR, 1/4NPT 0.60PSI (1/8NPT GAUGE PORT)
125	WPR-2	DWYER	UGJ-C10441N	PRESSURE GAUGE, 52MM 0-60PSI 1/8NPT, BACK CONNECT
126	WV-1	ASCO	SC8238T402 24DC	2-WAY NC PILOT OPERATED BRASS VALVE ,3/8NPT, 24VDC
127	WV-2	ASCO	8262R212 12-24DC	2-WAY NC DIRECT ACTING BRASS VALVE, 1/4NPT, 24VDC
128	WV-3	ASCO	8262R212 12-24DC	2-WAY NC DIRECT ACTING BRASS VALVE, 1/4NPT, 24VDC
129	Z-PROBE	SOLARTRON METROLOGY LTD.	DP/0.5/S	0.5MM RANGE, 0.01UM RESOLUTION, 0.1-0.25 UM READING ACCURACY, 0.1UM REPETABILITY, W/ORBIT 3 ELECTRONIC MODULE

Fin du tableau

Table C.2 Liste des composants fonctionnels du Métallographe 3D (2 de 2)

N°	REPÈRE	TYPE D'INSTRUMENT	TYPE D'E/S	SOUS-SYSTÈME	AJOUTÉ
1	C1-A	PRÉACTIONNEUR	SI / SO	ALIMENTATION	✓
2	C1-B	PRÉACTIONNEUR	SI / SO	ALIMENTATION	✓
3	C2	PRÉACTIONNEUR	SI / SO	ALIMENTATION	✓
4	CAM-1	CAPTEUR	GIGE	CARACTÉRISATION	
5	CB-1	IHM	DO	PROTECTION	✓
6	CB-2	IHM	DO	PROTECTION	✓
7	CB-3	IHM	DO	PROTECTION	✓
8	CB-4	IHM	DO	PROTECTION	✓
9	CB-5	IHM	DO	PROTECTION	✓
10	CEMO-A	PRÉACTIONNEUR	SI / SO	PROTECTION	✓
11	CEMO-B	PRÉACTIONNEUR	SI / SO	PROTECTION	✓
12	CEP	CAPTEUR	DI	NETTOYAGE	
13	CR1	PRÉACTIONNEUR	SI / SO	PROTECTION	
14	CR2	PRÉACTIONNEUR	DO	NETTOYAGE	
15	CR3	PRÉACTIONNEUR	DO	PRÉPARATION DE SURFACE	
16	DISC-1	IHM	DO	ALIMENTATION	✓
17	DRV-1	PRÉACTIONNEUR	DO / AO	PRÉPARATION DE SURFACE	
18	DRV-2	PRÉACTIONNEUR	DO / AO	NETTOYAGE	
19	DRV-X	PRÉACTIONNEUR	ETHERCAT	CARACTÉRISATION	
20	DRV-Z	PRÉACTIONNEUR	ETHERCAT	CARACTÉRISATION	
21	DV-1	PRÉACTIONNEUR	DO	ALIMENTATION	✓
22	DV-2	PRÉACTIONNEUR	SO	ALIMENTATION	✓

⋮

⋮

N°	REPÈRE	TYPE D'INSTRUMENT	TYPE D'E/S	SOUS-SYSTÈME	AJOUTÉ
23	EMO1	IHM	SI	PROTECTION	
24	EMO2	IHM	SI	PROTECTION	
25	EMO3	IHM	SI	PROTECTION	
26	ENC-Z	CAPTEUR	SINCOS	CARACTÉRISATION	
27	FC-1A	IHM	MO	PRÉPARATION DE SURFACE	✓
28	FC-1B	IHM	MO	PRÉPARATION DE SURFACE	✓
29	FC-2A	IHM	MO	PRÉPARATION DE SURFACE	✓
30	FC-2B	IHM	MO	PRÉPARATION DE SURFACE	✓
31	FS-1	CAPTEUR	DI	PROTECTION	✓
32	FS-2	CAPTEUR	DI	NETTOYAGE	✓
33	GR-C	CAPTEUR	RI	MANIPULATION	
34	GR-O	CAPTEUR	RI	MANIPULATION	
35	HX	CAPTEUR	DI	CARACTÉRISATION	
36	HZ	CAPTEUR	DI	CARACTÉRISATION	
37	KS-1	IHM	SI	CONTRÔLE	
38	LAMP-1	MODULE D'ALIMENTATION	-	CARACTÉRISATION	
39	LR-MATE	ACTIONNEUR	-	MANIPULATION	
40	LT-1	IHM	SO	CONTRÔLE	
41	LT-2	IHM	DO	CONTRÔLE	✓
42	LT-3	IHM	DO	CONTRÔLE	✓
43	LT-4	IHM	DO	CONTRÔLE	
44	LXN	CAPTEUR	DI	CARACTÉRISATION	
45	LXP	CAPTEUR	DI	CARACTÉRISATION	
46	LZN	CAPTEUR	DI	CARACTÉRISATION	
47	LZP	CAPTEUR	DI	CARACTÉRISATION	
48	MAN-CYL-1	ACTIONNEUR	-	MANIPULATION	
49	MAN-GRP	ACTIONNEUR	-	MANIPULATION	
50	MOD1	MODULE D'INTERFACE	ETHERCAT	CONTRÔLE	
51	MOD2	MODULE D'INTERFACE	ETHERCAT	CONTRÔLE	
52	MOD3	MODULE D'INTERFACE	ETHERCAT	CONTRÔLE	
53	MOD4	MODULE D'INTERFACE	ETHERCAT	CONTRÔLE	
54	MOD5	MODULE D'INTERFACE	ETHERCAT	CONTRÔLE	
55	MOD6	MODULE D'INTERFACE	ETHERCAT	CONTRÔLE	
56	MOD7	MODULE DE COMMUNICATION	ETHERCAT	CONTRÔLE	
57	MOT-X	ACTIONNEUR	-	CARACTÉRISATION	
58	MOT-Z	ACTIONNEUR	-	CARACTÉRISATION	
59	MTR-1	ACTIONNEUR	-	PRÉPARATION DE SURFACE	
60	MTR-2	ACTIONNEUR	-	NETTOYAGE	
61	MTR-2	TRANSMETTEUR	-	NETTOYAGE	
62	MTR-3	ACTIONNEUR	-	PRÉPARATION DE SURFACE	
63	MTR-4	ACTIONNEUR	-	PRÉPARATION DE SURFACE	
64	MV-1	IHM	MO	ALIMENTATION	✓
65	ORBIT-USB	MODULE DE COMMUNICATION	USB	CARACTÉRISATION	
66	PA-1	MODULE D'ALIMENTATION	-	ALIMENTATION	

⋮

⋮

N°	REPÈRE	TYPE D'INSTRUMENT	TYPE D'E/S	SOUS-SYSTÈME	AJOUTÉ
67	PA-2	MODULE D'ALIMENTATION	-	ALIMENTATION	
68	PA-3	MODULE D'ALIMENTATION	-	ALIMENTATION	
69	PA-4	MODULE D'ALIMENTATION	-	ALIMENTATION	
70	PB-1	IHM	SI	CONTRÔLE	
71	PB-2	IHM	SI	CONTRÔLE	
72	PB-3	IHM	SI	CONTRÔLE	
73	PB-4	IHM	SI	CONTRÔLE	
74	PB-5	IHM	SI	CONTRÔLE	
75	PLC	IHM / MODULE DE CONTRÔLE	-	CONTRÔLE	
76	POL-CYL-1	ACTIONNEUR	-	PRÉPARATION DE SURFACE	
77	POL-CYL-2	ACTIONNEUR	-	PRÉPARATION DE SURFACE	
78	PR-1	IHM	MI / MO	PRÉPARATION DE SURFACE	✓
79	PR-2	IHM	MI / MO	NETTOYAGE	✓
80	PR-3	IHM	MI / MO	MANIPULATION	✓
81	PR-4	IHM	MI / MO	MANIPULATION	✓
82	PRS4	CAPTEUR	DI	NETTOYAGE	
83	PS-1	IHM / CAPTEUR	DI	ALIMENTATION	
84	PSU-0	MODULE D'ALIMENTATION	-	ALIMENTATION	
85	PSU-1	MODULE D'ALIMENTATION	-	ALIMENTATION	
86	RECP-1	MODULE D'ALIMENTATION	-	ALIMENTATION	✓
87	RECP-2	MODULE D'ALIMENTATION	-	ALIMENTATION	✓
88	RFID-1	CAPTEUR	SI	PROTECTION	
89	RFID-2	CAPTEUR	SI	PROTECTION	
90	RFID-3	CAPTEUR	SI	PROTECTION	
91	RFID-4	CAPTEUR	SI	PROTECTION	
92	RJ3-OP	IHM	RI / RO / SI	MANIPULATION	
93	RJ3-CTRL	MODULE DE CONTRÔLE	-	MANIPULATION / CONTRÔLE	
94	RJ3-TP	IHM	SI / FANUC COM.	MANIPULATION	
95	RS232-1	MODULE DE COMMUNICATION	RS232	CONTRÔLE	
96	SLT	MODULE DE CONTRÔLE	-	PROTECTION / CONTRÔLE	
97	SMOD1	MODULE D'INTERFACE	SOE	PROTECTION	
98	SMOD2	MODULE D'INTERFACE	SOE	PROTECTION	
99	SMOD3	MODULE D'INTERFACE	SOE	PROTECTION	
100	SMOD4	MODULE D'INTERFACE	SOE	PROTECTION	
101	SMOD5	MODULE D'INTERFACE	SOE	PROTECTION	
102	SMRM-1	PRÉACTIONNEUR / ACTIONNEUR	USB	CARACTÉRISATION	
103	SMRM-2	PRÉACTIONNEUR / ACTIONNEUR	USB	CARACTÉRISATION	
104	SV-1	PRÉACTIONNEUR	DO	PRÉPARATION DE SURFACE	✓
105	SV-2	PRÉACTIONNEUR	DO	NETTOYAGE	✓
106	SV-3	PRÉACTIONNEUR	RO	MANIPULATION	
107	SV-4	PRÉACTIONNEUR	RO	MANIPULATION	
108	SW-ETH	MODULE DE COMMUNICATION	ETHERNET	CONTRÔLE	✓
109	SW-USB	MODULE DE COMMUNICATION	USB	CONTRÔLE	✓

⋮

⋮

N°	REPÈRE	TYPE D'INSTRUMENT	TYPE D'E/S	SOUS-SYSTÈME	AJOUTÉ
110	THL	CAPTEUR	DI	PRÉPARATION DE SURFACE	
111	THR	CAPTEUR	DI	PRÉPARATION DE SURFACE	
112	TS-1	PRÉACTIONNEUR	SO	PROTECTION	
113	TS-1	CAPTEUR	DI	PROTECTION	
114	TS-2	PRÉACTIONNEUR	SO	PROTECTION	
115	TS-2	CAPTEUR	DI	PROTECTION	
116	TS-3	PRÉACTIONNEUR	SO	PROTECTION	
117	TS-3	CAPTEUR	DI	PROTECTION	
118	USB-1	MODULE DE COMMUNICATION	USB	CONTRÔLE	
119	WB200	PRÉACTIONNEUR / MODULE DE CONTRÔLE	DO	PROTECTION	✓
120	WD1	CAPTEUR	DI	PROTECTION	✓
121	WPC	IHM / MODULE DE CONTRÔLE	-	CONTRÔLE	✓
122	WPR-1	IHM	MO	PRÉPARATION DE SURFACE	✓
123	WPR-1	IHM	MI	PRÉPARATION DE SURFACE	✓
124	WPR-2	IHM	MO	NETTOYAGE	✓
125	WPR-2	IHM	MI	NETTOYAGE	✓
126	WV-1	PRÉACTIONNEUR	DO	ALIMENTATION	✓
127	WV-2	PRÉACTIONNEUR	DO	PRÉPARATION DE SURFACE	✓
128	WV-3	PRÉACTIONNEUR	DO	NETTOYAGE	✓
129	Z-PROBE	CAPTEUR	ORBIT®	CARACTÉRISATION	

*Fin du tableau*





# ANNEXE D

## SCHÉMAS FONCTIONNELS DES SOUS-SYSTÈMES FINAUX

Cette annexe fournit plusieurs tableaux descriptifs ainsi que les schémas fonctionnels du Métallographe 3D final. Les tableaux à la section D.1 offrent plusieurs listes descriptives sur les différents constituants des schémas à la section D.2. La figure D.1 indique les différents types de connexion reliant les différents blocs fonctionnels. Dans un schéma, chaque bloc représente un sous-système ou un composant fonctionnel et celui-ci est identifié par un nom de repère (c.-à-d. un sous-système du tableau 3.7 ou un élément de l'annexe C). En règle générale, les flux à gauche et à droite d'un bloc représentent des flux d'énergie (chaîne d'énergie), alors les flux au-dessus et au-dessous du bloc désignent les flux de contrôle, de commande, d'information ou de communication (chaîne d'information). Il est à noter que les schémas n'illustrent pas l'emplacement réel des constituants au sein du système, mais sont une représentation fidèle de l'ensemble des interconnexions du système.

### D.1 Tableaux descriptifs

Tableau D.1 Liste des effecteurs et unités de stockage du système final

Repère	Type	Description
AXIS-X	Effecteur	Axe linéaire X du microscope (motorisé)
AXIS-Y	Effecteur	Axe linéaire Y du microscope (non motorisé)
AXIS-Z	Effecteur	Axe linéaire Z du microscope (motorisé)
CLE-BRUSH	Effecteur	Brosse de nettoyage
CLE-PA	Effecteur	Tuyau avec embouts multiples pour sortie d'air pressurisé
CLE-PW	Effecteur	Tuyau avec embouts multiples pour sortie d'eau pressurisée
CLE-SOAP	Stockage	Cuve de rétention d'eau savonneuse
CLE-TUB	Stockage	Cuve de rétention de résidus de nettoyage et polissage
MAN-FGR	Effecteur	Doigts de la pince pneumatique
MAN-GRP	Effecteur	Pince pneumatique, effecteur de terminaison robot ( <i>end-effector</i> )
MAN-SH	Effecteur	Porte-échantillon ( <i>sample holder</i> )
OBJ	Effecteur	Objectif du système de microscopie motorisé
OBJ-F	Effecteur	Plan focal de l'objectif OBJ
POL-ABR	Effecteur	Embout pour écoulement de liquide abrasif
POL-CABR	Stockage	Contenant de rétention du liquide abrasif
POL-CLUB	Stockage	Contenant de rétention du lubrifiant
POL-FIX	Effecteur	Support de maintien des papiers abrasifs et draps de polissage
POL-LUB	Effecteur	Embout pour écoulement de lubrifiant
POL-PLRO	Effecteur	Plateau rotatif du support pneumatique
POL-PW	Effecteur	Embout pour écoulement d'eau

⋮

⋮

Repère	Type	Description
POL-RTBL	Effecteur	Plateau de polissage
POL-STMO	Effecteur	Structure mobile de contre-pression de la station de polissage
PRO-WDE	Stockage	Cuve de rétention en cas de fuite
Z-TIP	Effecteur	Pointe du palpeur numérique Z-PROBE

*Fin du tableau*

Tableau D.2 Liste des Interfaces Homme-Machine (IHM)

Repère	S.S.	Description
ADJ-YP	CAR	Vis micrométrique d'ajustement de l'axe linéaire Y du microscope (+)
ADJ-YN	CAR	Vis micrométrique d'ajustement de l'axe linéaire Y du microscope (-)
DISC-1	PSU	Disjoncteur principal d'alimentation électrique du système
FC-1	POL	Vanne de réglage du débit en entrée des cylindres de POL-STMO
FC-2	POL	Vanne de réglage du débit en sortie des cylindres de POL-STMO
LT-2	CTRL	Indicateur lumineux blanc - machine sous-tension
LT-3	CTRL	Indicateur lumineux vert - énergie opérative engagée
LT-4	CTRL	Indicateur lumineux vert/rouge - énergie opérative engagée/coupée
MAN-MS1	MAN	Vis micrométrique d'ajustement de plan du porte-échantillon (1)
MAN-MS2	MAN	Vis micrométrique d'ajustement de plan du porte-échantillon (2)
MAN-MS3	MAN	Vis micrométrique d'ajustement de plan du porte-échantillon (3)
MV-1	WSU	Valve manuelle principale pour l'alimentation en eau
MV-2	CLE	Valve manuelle pour la récupération des déchets de la cuve de nettoyage
PBE6	CTRL	Station de commande à six boutons
LT-1	CTRL	Indicateur lumineux blanc - machine sous-tension
PB-1	CTRL	Bouton de réarmement machine
PB-2	CTRL	Bouton de mise en marche machine
PB-3	CTRL	Bouton de mise en arrêt machine
KS-1	CTRL	Sélecteur à clé du mode d'opération machine
EMO-1	PRO	Bouton d'arrêt d'urgence
PBE3-A	CTRL	Station de commande à trois boutons (A)
PB-4	CTRL	Bouton de mise en arrêt machine
EMO-2	PRO	Bouton d'arrêt d'urgence
PBE3-B	CTRL	Station de commande à trois boutons (B)
PB-5	CTRL	Bouton de mise en arrêt machine
EMO-3	PRO	Bouton d'arrêt d'urgence
PC	CTRL	Ordinateur Windows et application de commande Metallograph Cockpit
PLC	CTRL	PC-embarqué Windows et application TwinCAT
PR-1	POL	Ajustement de la pression d'air pour POL-STMO
PR-2	CLE	Ajustement de la pression d'air pour CLE-PA
PR-3	MAN	Ajustement de la pression d'air pour MAN-GRP

⋮

⋮

Repère	S.S.	Description
PR-4	MAN	Ajustement de la pression d'air pour MAN-FGR
PRO-LFD	PRO	Porte frontale gauche partie supérieure
PRO-RLD	PRO	Porte frontale droite partie supérieure
PRO-SD	PRO	Porte latérale partie supérieure
PRO-RD	PRO	Porte arrière partie inférieure
RJ3-TP	MAN	Terminal de programmation robot
EMO	PRO	Bouton d'arrêt d'urgence
EBL	CTRL	Bouton d'activation du TP
RJ3-OP	MAN	Console opérateur du contrôleur robot
EMO	PRO	Bouton d'arrêt d'urgence
MODE	CTRL	Sélecteur de mode d'opération robot
ON	CTRL	Bouton de mise en marche du contrôleur robot
OFF	CTRL	Bouton de mise en arrêt du contrôleur robot
WPR-1	POL	Ajustement de la pression d'eau pour POL-PW
WPR-2	CLE	Ajustement de la pression d'eau pour CLE-PW

*Fin du tableau*

Tableau D.3 Liste des connexions d'énergies opératives

Repère	Specs.	Description
<b>Énergie électrique</b>		
C2-DRV-1	120 VAC	Alimentation électrique de la commande moteur DRV-1
C2-DRV-2	24 VDC	Alimentation électrique de la commande moteur DRV-2
C2-DV-2	24 VDC	Signal d'activation de l'électrovanne secondaire (DV-2)
CR1	24 VDC	Signal d'activation de TS-1, TS-2 et TS-3 (verrouille les portes du niveau supérieur)
PA-1	12 VDC	Alimentation électrique de LAMP-1
PA-2	12 VDC	Alimentation électrique de CAM-1
PA-3	5 VDC	Alimentation électrique de SW-USB
PA-4	5 VDC	Alimentation électrique de SW-ETH
PS-BAR	120 VAC	Alimentation électrique des bars d'alimentation RECP-1 et RECP-2
PS-CTRL	24 VDC	Alimentation électrique des pré-actionneurs/capteurs et actionneurs de base puissance
PS-DV-1	24 VDC	Signal d'activation de l'électrovanne principale d'air comprimé (DV-1)
PS-EMO	24 VDC	Alimentation électrique du circuit redondant d'arrêt d'urgence et autres composantes fonctionnelles
PS-PLC	24 VDC	Alimentation électrique de l'ordinateur embarqué (PLC) et de ces cartes d'E/S standards et de sécurité
PS-RJ3	208 VAC 3P	Alimentation électrique du contrôleur robot RJ3
<b>Énergie pneumatique</b>		

⋮

⋮

Repère	Specs.	Description
PR-1	N/D	Alimentation pneumatique régulée pour les effecteurs POL-CYL-1 et POL-CYL-2
PR-2	N/D	Alimentation pneumatique régulée pour l'effecteur CLE-PA
PR-3	N/D	Alimentation pneumatique régulée pour MAN-CYL-1
PR-4	N/D	Alimentation pneumatique régulée pour MAN-GRP
<b>Énergie hydraulique</b>		
WR-1	N/D	Alimentation hydraulique régulée pour l'effecteur POL-PW
WR-2	N/D	Alimentation hydraulique régulée pour l'effecteur CLE-PW

*Fin du tableau*

Tableau D.4 Définition des signaux de contrôle et de communication

Repère	Description
AoE	Protocole de communication <i>ADS over EtherCAT</i>
CoE	Protocole de communication <i>CAN over EtherCAT</i>
ECAT	Bus de terrain EtherCAT
EI/EO	Signaux d'E/S de l'unité logique de sécurité câblée
ETH-1	Connexion Ethernet avec l'ordinateur embarqué de contrôle (PLC)
ETH-2	Connexion Ethernet avec l'ordinateur de commande (PC)
ETH-3	Connexion Ethernet avec la caméra numérique (CAM-1)
ETH-4	Connexion Ethernet avec le contrôleur robot (RJ3-CTRL)
I/O	Signaux d'E/S connectés à l'une des cartes standards du PLC (MOD1 à 6)
MI/MO	Signaux d'E/S d'énergie mécanique (air comprimé, liquide, etc.)
RI/RO	Signaux d'E/S du bras robotisé à six axes
SI/SO	Signaux d'E/S de sécurité connectés à l'une des cartes de sécurité du PLC (SMOD1 à 5)
SoE	Protocole de communication <i>Safety over EtherCAT</i>
USB-1	Connexion USB avec l'ordinateur de commande (PC)
USB-2	Connexion et alimentation USB pour SMRM-1 (analyseur)
USB-3	Connexion et alimentation USB pour SMRM-2 (polariseur)
USB-4	Connexion et alimentation USB pour le réseau et palpeur Orbit

Tableau D.5 Caractéristique des unités de contrôle

Unité de contrôle	Spécifications générales	Système d'exploitation / Logiciel(s)
<b>Ordinateur embarqué industriel (PLC)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Intel® Core™ i7 dual core processor 1,5 GHz</li> <li>– 8 Go mémoire disque</li> <li>– 2 Go mémoire vive</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Windows Embedded Standard 7 P (32-Bit)</li> <li>– Logiciels/licences : <ul style="list-style-type: none"> <li>– TwinCAT 3 XAR</li> <li>– License CPU</li> <li>– TwinSAFE</li> <li>– TC3 Modbus Server</li> </ul> </li> </ul>
<b>Carte logique de sécurité TwinSAFE (SLT)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Temps de cycle : approx. 500 <math>\mu</math>s</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Normes de sécurité : <ul style="list-style-type: none"> <li>– DIN EN ISO 13849-1 :2008 (Cat. 4, PL e)</li> <li>– EN 61508 :2010 (SIL 3)</li> </ul> </li> </ul>
<b>Ordinateur usagé (PC)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Intel® Core™ i5-6200 CPU @ 2.30 GHz</li> <li>– 250 Go mémoire disque</li> <li>– 8 go mémoire vive</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Microsoft Windows 10</li> <li>– Microsoft .NET Framework 4.6</li> </ul>
<b>Contrôleur bras robot (RJ3-CTRL)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– N/D</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Handling PRO V5.30-2</li> </ul>

## D.2 Schémas fonctionnels








	Connexion électrique de haute puissance
	Connexion électrique de basse puissance
	Connexion électrique de contrôle
	Connexion pneumatique
	Connexion hydraulique
	Connexion mécanique
	Communication/Bus de terrain

Figure D.1 Légende des types de connexion des schémas synoptiques

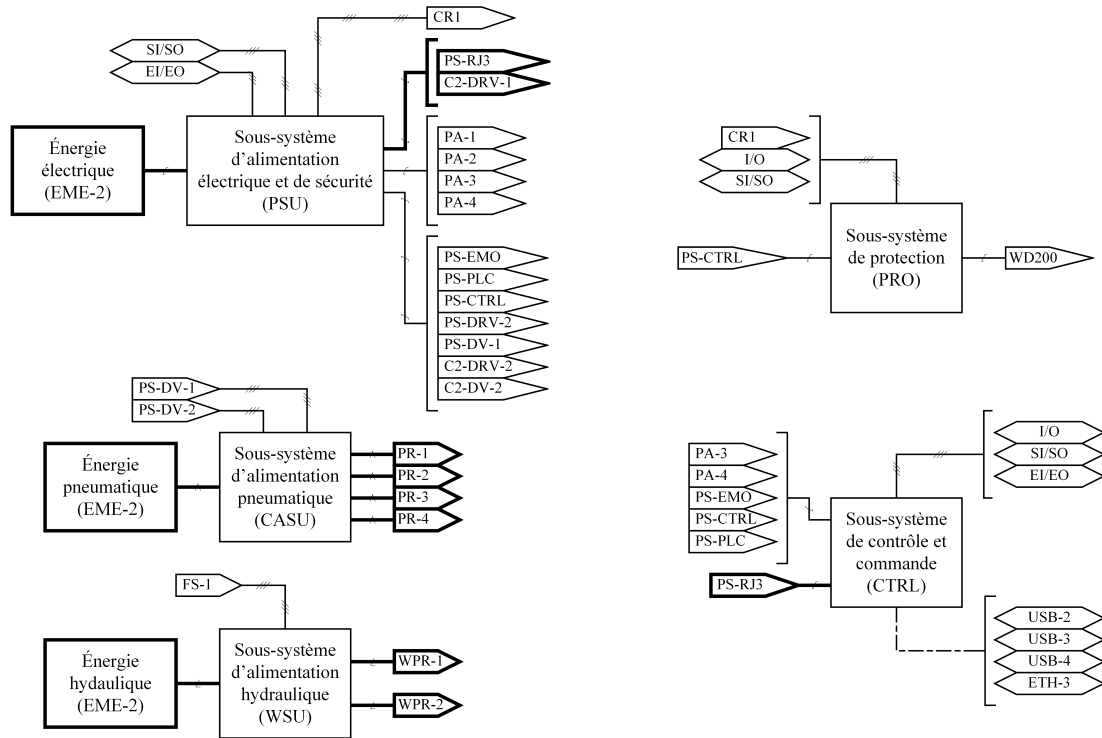


Figure D.2 Schéma synoptique du système et des sous-systèmes (1 de 2)

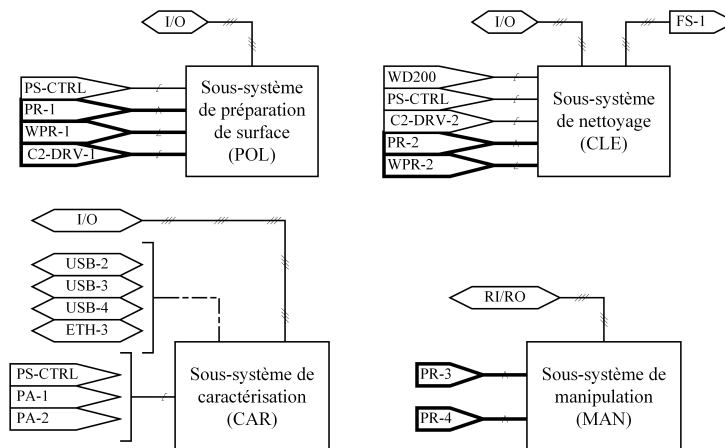


Figure D.3 Schéma synoptique du système et des sous-systèmes (2 de 2)

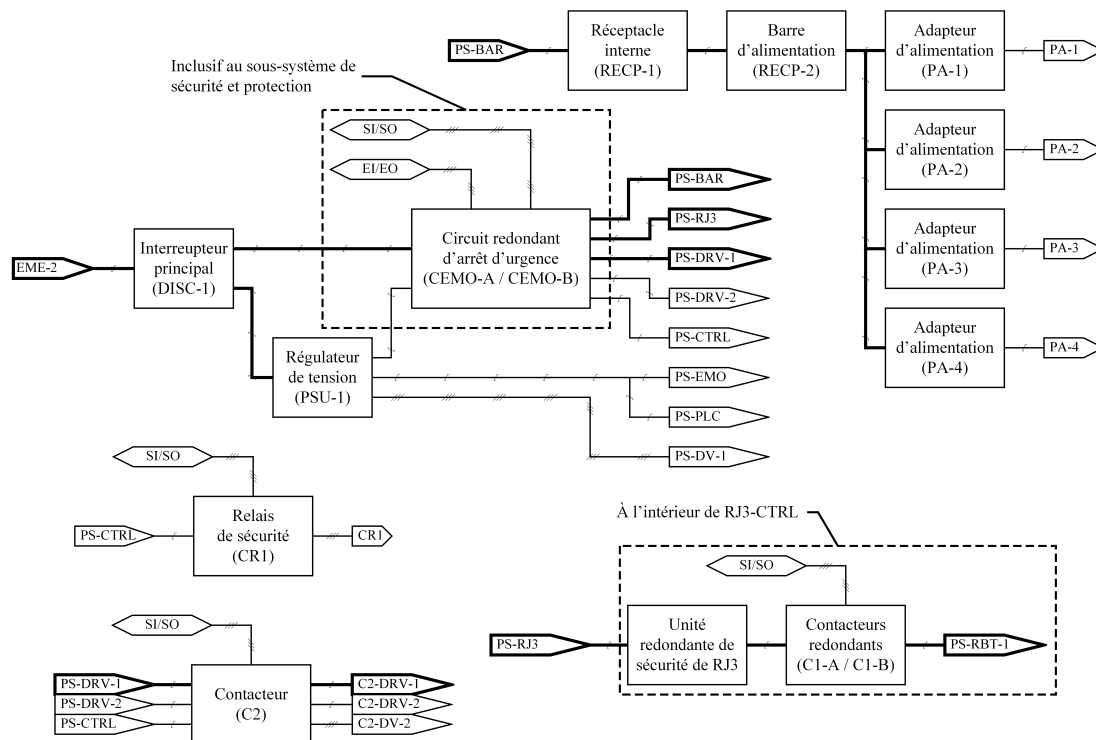


Figure D.4 Schéma synoptique du sous-système d'alimentation électrique PSU

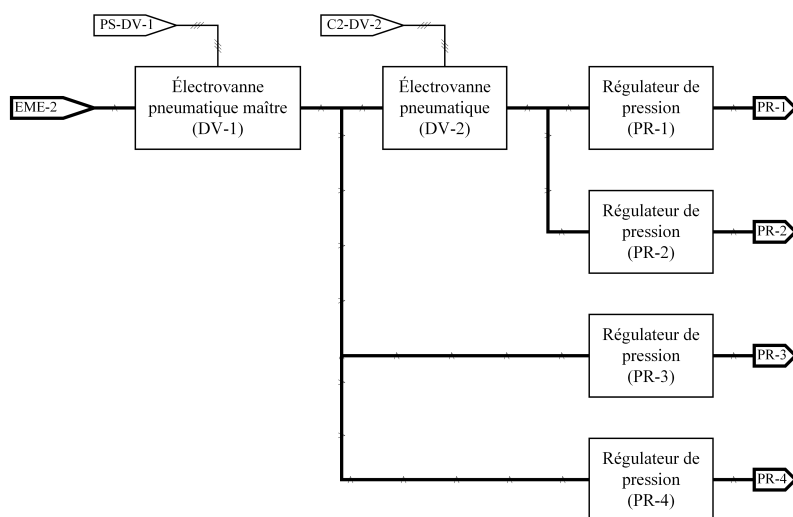


Figure D.5 Schéma synoptique du sous-système d'alimentation pneumatique CASU

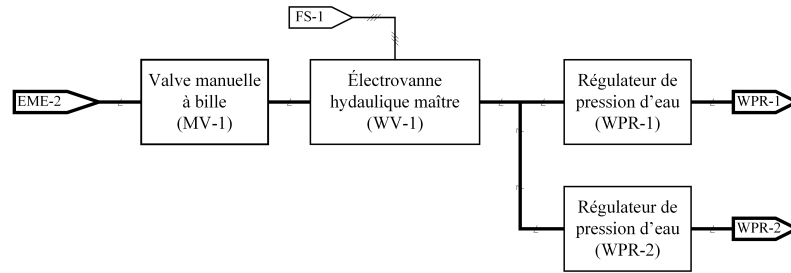


Figure D.6 Schéma synoptique du sous-système d'alimentation hydraulique WSU

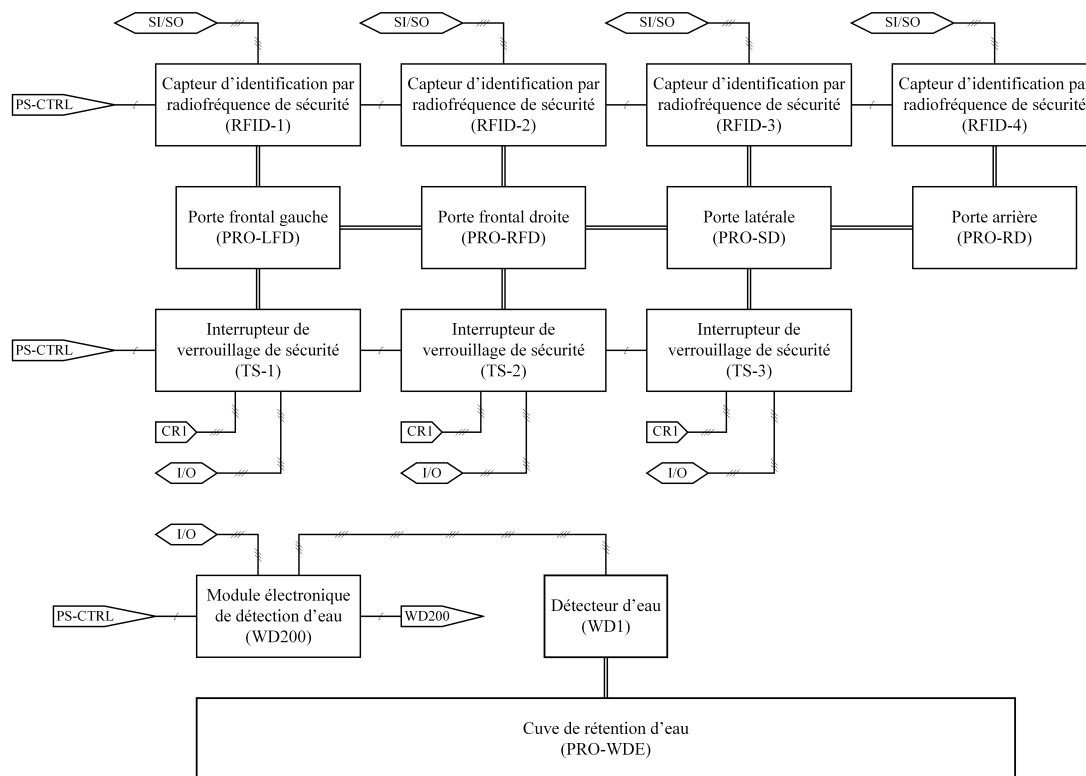


Figure D.7 Schéma synoptique du sous-système de protection PRO



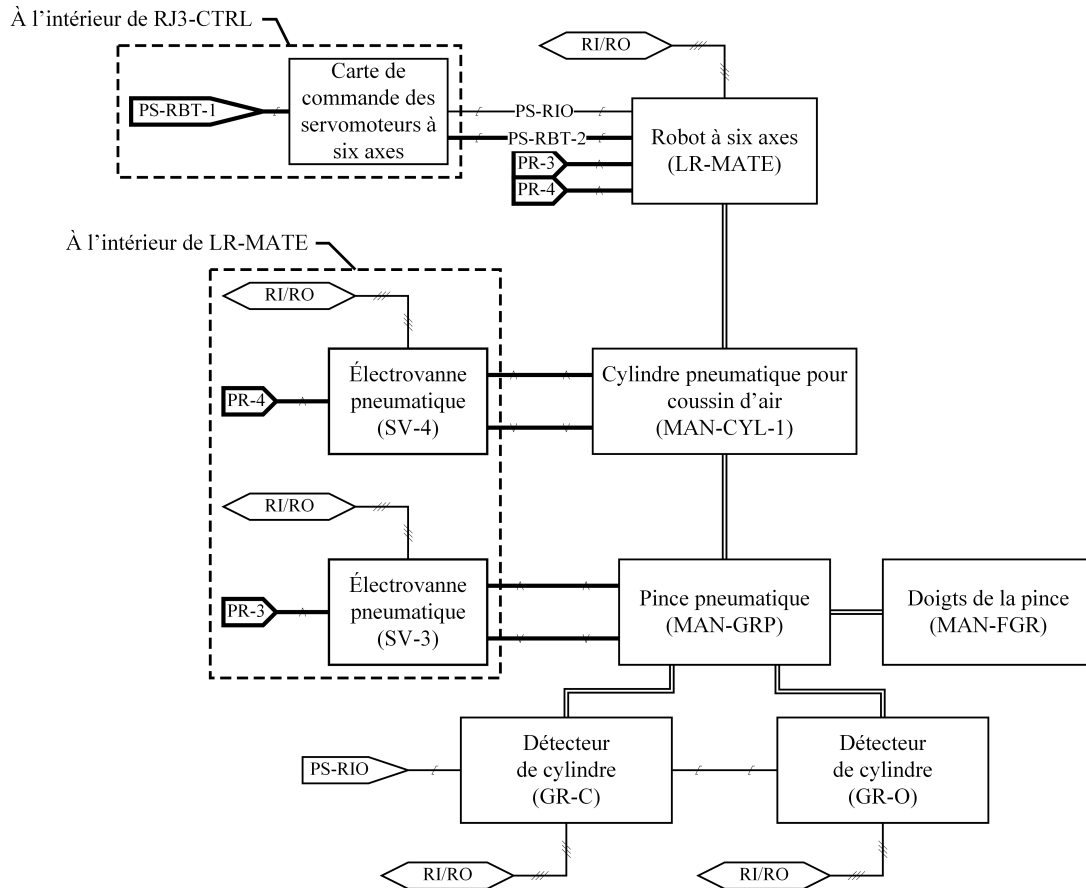


Figure D.8 Schéma synoptique du sous-système de manipulation MAN (1 de 2)

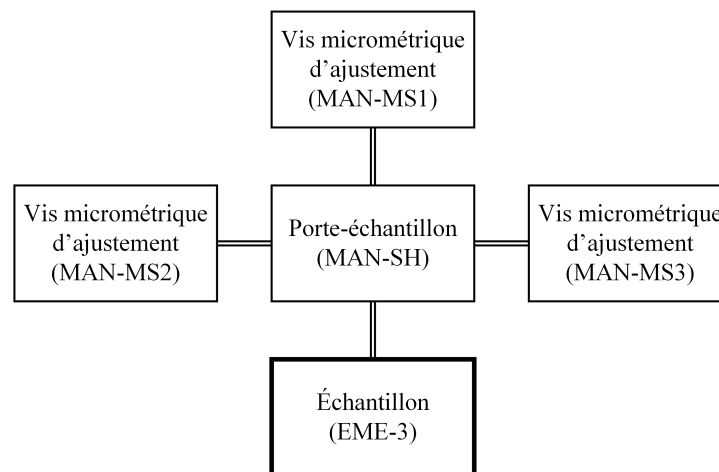


Figure D.9 Schéma synoptique du sous-système de manipulation MAN (2 de 2)

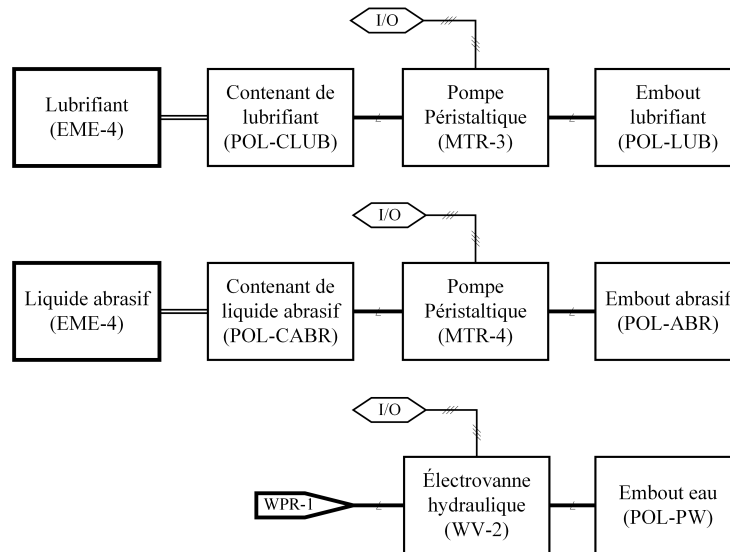


Figure D.10 Schéma synoptique du sous-système de préparation de surface POL (1 de 3)

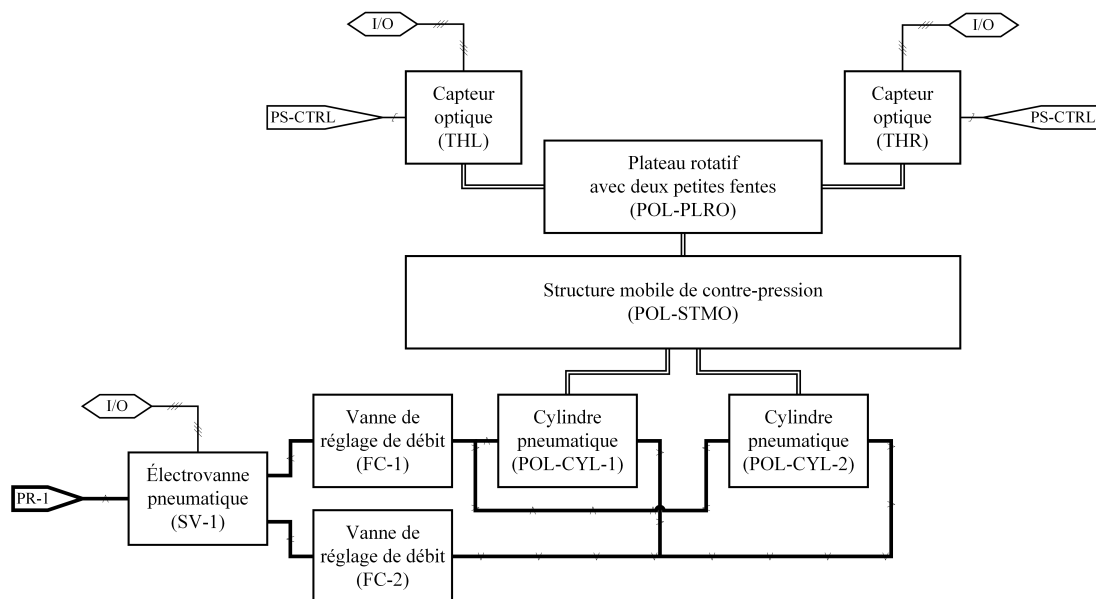


Figure D.11 Schéma synoptique du sous-système de préparation de surface POL (2 de 3)

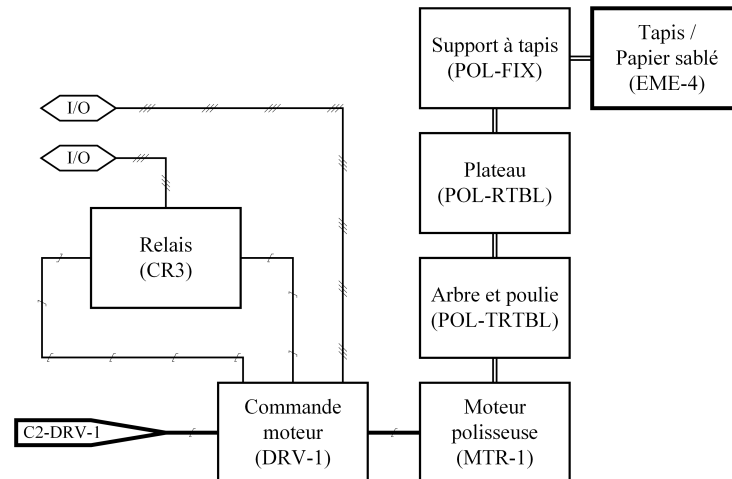


Figure D.12 Schéma synoptique du sous-système de préparation de surface POL (3 de 3)

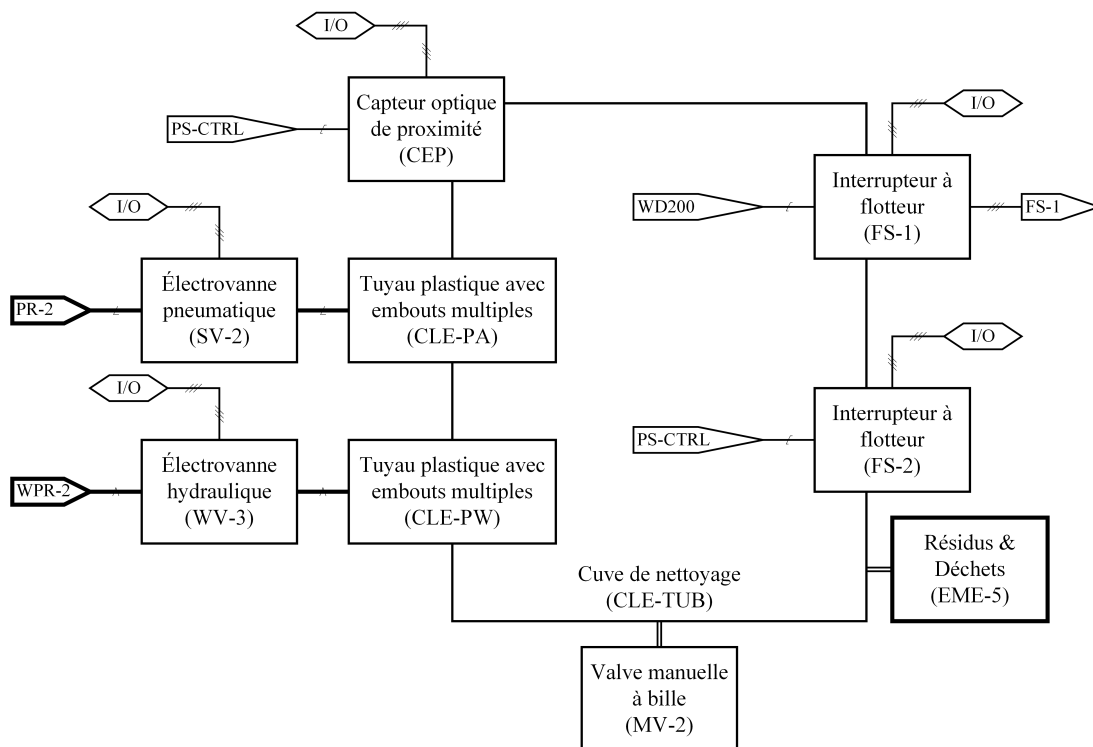


Figure D.13 Schéma synoptique du sous-système de nettoyage CLE (1 de 2)

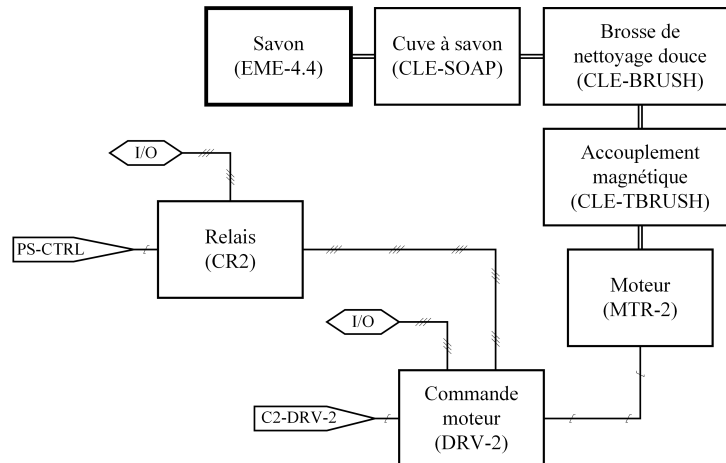


Figure D.14 Schéma synoptique du sous-système de nettoyage CLE (2 de 2)

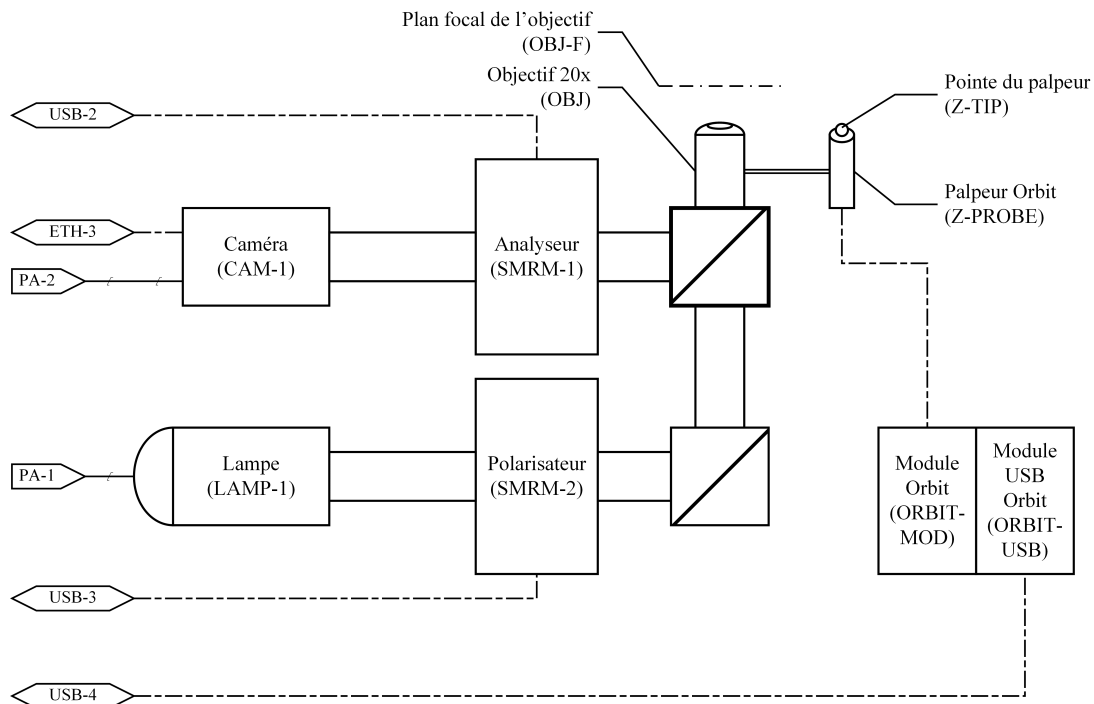


Figure D.15 Schéma synoptique du sous-système de caractérisation de surface CAR (1 de 2)

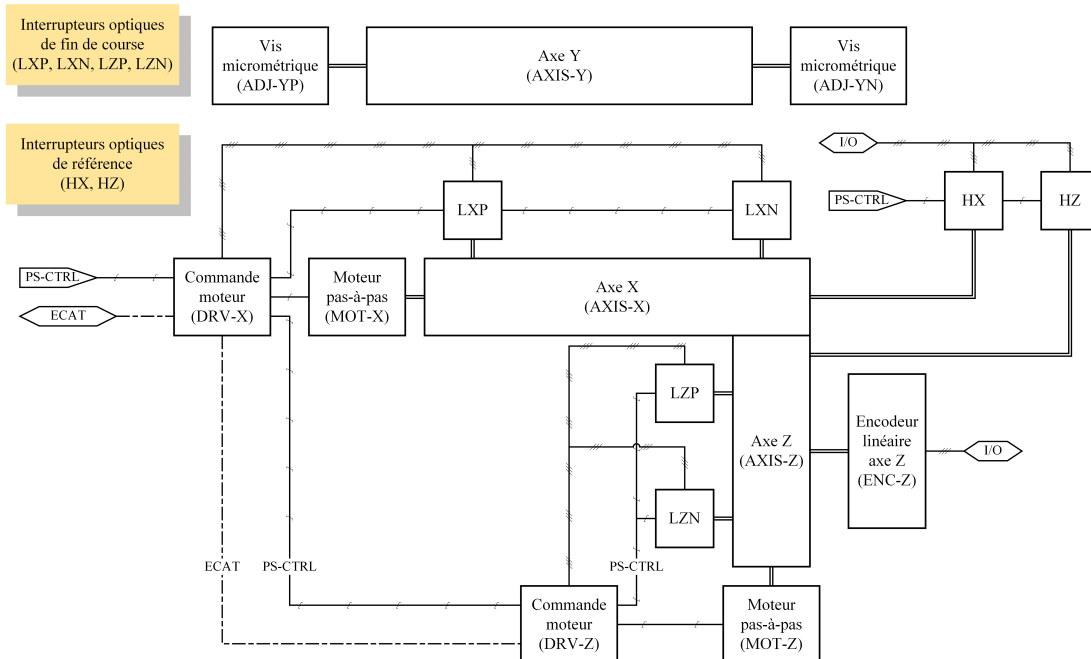


Figure D.16 Schéma synoptique du sous-système de caractérisation de surface CAR (2 de 2)

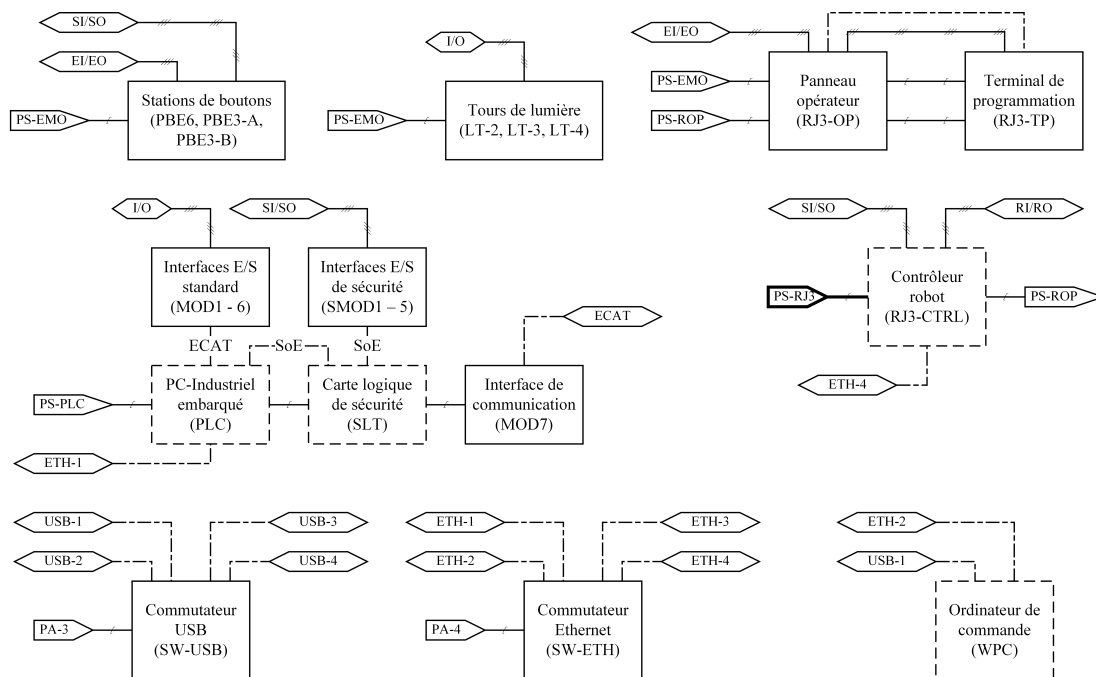


Figure D.17 Schéma synoptique du sous-système de contrôle et de commande CTRL



# ANNEXE E

## TECHNOLOGIE ADS

La technologie ADS (*Automation Device Specifications*) de TwinCAT a un rôle de communication très important au sein de l'environnement TwinCAT et de l'application de conduite. Vu son influence, il convient de présenter les concepts élémentaires de cette technologie. Tout d'abord, Beckhoff définit la technologie ADS comme « une interface de communication qui gère le type d'accès aux modules ADS, indépendante du matériel et de la couche de transport [utilisés] » [50]. Globalement, l'interface ADS permet de :

- Communiquer avec des modules ADS ;
- Implémenter des modules ADS (client/serveur) ;
- Accéder aux images de processus (*process image*) des modules ADS ;
- Accéder aux informations symboliques du PLC ;
- Lire et écrire de manière synchrone et asynchrone ;
- Recevoir des messages cycliquement ou sous forme d'événement.

Par défaut, la fonctionnalité ADS s'installe automatiquement avec le logiciel TwinCAT 3 fonctionnant sur des systèmes d'exploitation Windows. De plus, la compagnie Beckhoff distribue gratuitement des interfaces de programmation d'application (API) pour des langages de programmation couramment utilisés. Ces bibliothèques de classes proposent des fonctions pour communiquer avec d'autres modules ADS depuis une application externe ou un logiciel tiers. Ces API sont offerts sous la forme d'une DLL (utilisation avec C/C++) et d'une composante .NET (utilisation avec C#, VB.NET, etc.). Les sous-sections suivantes présentent les concepts clés de cette interface de communication :

- Modules ADS ;
- Identification ADS ;
- Accès aux données via ADS ;
- Notifications ADS.

Pour tout autre renseignement supplémentaire concernant la technologie ADS qui n'est pas couverte dans ce document, il est suggéré au lecteur de consulter le site d'information Beckhoff [50] à la section TwinCAT 3/TE1000 XAE/Technologies/ADS.

### Modules ADS

Essentiellement, la technologie ADS permet l'échange d'informations entre différents modules logiciels de TwinCAT. Celle-ci considère chaque composante logicielle (p. ex. PLC, SAFETY, NC, HMI, etc.) d'un système TwinCAT comme une entité indépendante. L'interface d'ADS se base sur un modèle client-serveur, où les clients ADS sollicitent des informations ou envoient des commandes à des serveurs ADS (p. ex. programme PLC).

L'échange de messages entre les clients et serveurs ADS s'effectue au moyen du protocole de transmission défini par ADS par le biais d'un agent de messagerie (*ADS message router*). Cet agent organise et transmet tous les messages des systèmes TwinCAT via des connexions TCP/IP. Ces agents de messagerie sont présents sur tous les ordinateurs où

le logiciel TwinCAT est installé ainsi que sur les contrôleurs et terminaux Beckhoff. L'interface ADS a la capacité de communiquer au-delà de la frontière matérielle, c'est-à-dire que les ordinateurs ou contrôleurs TwinCAT d'un même réseau peuvent communiquer ensemble. La figure E.1 schématise conceptuellement la technologie de communication ADS d'un système TwinCAT.

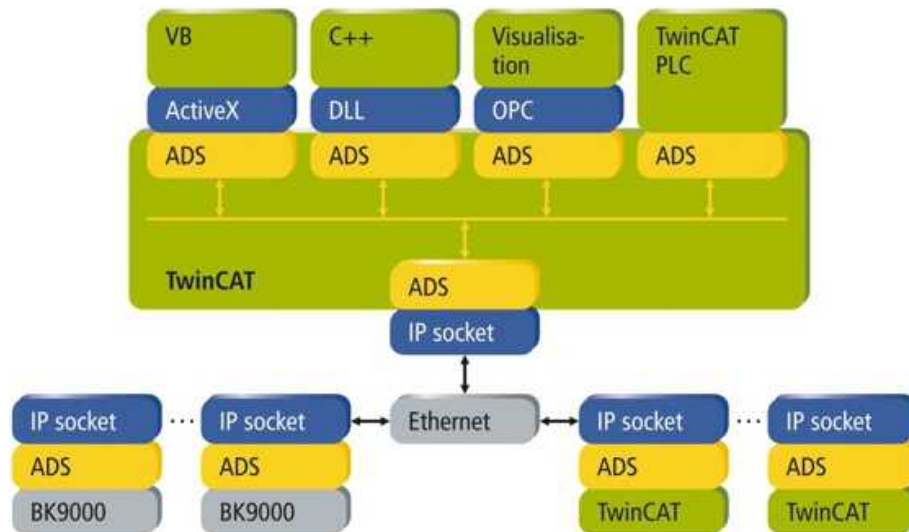


Figure E.1 Schématisation de la couche de transport ADS [50]

### Identification ADS

Ensuite, un module ADS sur le réseau se définit par deux identifiants : une adresse réseau AMS *Automation Message Specification* et un port ADS. Par défaut, un système TwinCAT a une adresse AMS basée sur l'adresse TCP/IP de l'ordinateur hôte avec l'extension «.1.1». Il est possible de changer cette adresse arbitrairement. Par la suite, chaque composante logicielle d'un système TwinCAT se distingue par un port ADS unique. TwinCAT retient déjà certains ports pour ces différents modules. Par exemple, le programme exécutable PLC du Métallographe possède le port 851.

### Accès aux données

Le moyen de base d'un module ADS pour accéder à un espace mémoire est via la lecture ou l'écriture par groupe et décalage d'adresse mémoire (*IndexGroup / IndexOffset*). Cette combinaison d'adresses permet d'accéder aux images de processus d'un module ADS. Il existe d'autres moyens de lecture/écriture, comme l'accès par nom symbolique (*symbolic path*) ou via des gestionnaires symboliques (*symbolic handlers*).

Avec ADS, il est possible d'accéder à plusieurs types de données : primitifs (*int*, *bool*, *double*, *float*, etc.), chaînes de caractères (*string*), tableaux (*array*) et structures. Cependant, un point important est que la lecture et l'écriture de données ne sont pas à typage sûr (*type safe*), c'est-à-dire que les valeurs lues ou écrites doivent logiquement être organisées en mémoire (*marshalling/unmarshalling*) selon une structure bien précise. L'opération d'organiser les données en mémoire est la tâche du programme applicatif. Le système TwinCAT 3 utilise un alignement en mémoire de huit octets (*byte*). La figure E.2 compare les différents types de données de TwinCAT avec celles des langages de programmation IEC 61131-3, .NET, C# et Visual Basics.



System Manager	IEC61131-3	Correspondent .NET type	C# Keyword	Visual Basic Keyword
BIT	BOOL	System.Boolean	bool	Boolean
BIT8	BOOL	System.Boolean	bool	Boolean
BITARR8	BYTE	System.Byte	byte	Byte
BITARR16	WORD	System.UInt16	ushort	-
BITARR32	DWORD	System.UInt32	uint	-
INT8	SINT	System.SByte	sbyte	-
INT16	INT	System.Int16	short	Short
INT32	DINT	System.Int32	int	Integer
INT64	LINT	System.Int64	long	Long
UINT8	USINT	System.Byte	byte	Byte
UINT16	UINT	System.UInt16	ushort	-
UINT32	UDINT	System.UInt32	uint	-
UINT64	ULINT	System.UInt64	ulong	-
FLOAT	REAL	System.Single	float	Single
DOUBLE	LREAL	System.Double	double	Double

Figure E.2 Comparaison de différents types de données du logiciel TwinCAT avec divers langages de programmation populaires [50]

### Notifications ADS

En dernier point, un autre concept très important de l'interface ADS est l'enregistrement de notifications ADS. Brièvement, lorsqu'une notification ADS est enregistrée, celle-ci est automatiquement déclenchée par le système TwinCAT lorsque la condition d'émission est atteinte. Plusieurs modes de diffusion et de fréquence sont possibles (p. ex. cycliquement selon un temps spécifique, lors d'un changement de valeur avec horodatage (*timestamp*), etc.). Par exemple, au cœur d'un client ADS, il est possible d'enregistrer une notification ADS en spécifiant un espace mémoire spécifique (%M) d'un programme PLC et, comme condition d'émission, un changement de la valeur de l'espace mémoire. Donc, lorsque la notification ADS est transmise au programme client, ce dernier peut alors lire les informations liées à l'événement telles que la valeur modifiée, l'horodatage et toutes autres informations pertinentes.



# ANNEXE F

## DIAGRAMMES D'ACTIVITÉ DES SÉQUENCES AUTOMATISÉES

Cette annexe présente les diagrammes d'activité des séquences automatisées finales de caractérisation de surface, de prépolissage et polissage et de nettoyage. De plus, cette annexe décrit les séquences de manipulations automatisées du système robotisé.

### F.1 Séquence automatisée de caractérisation de surface

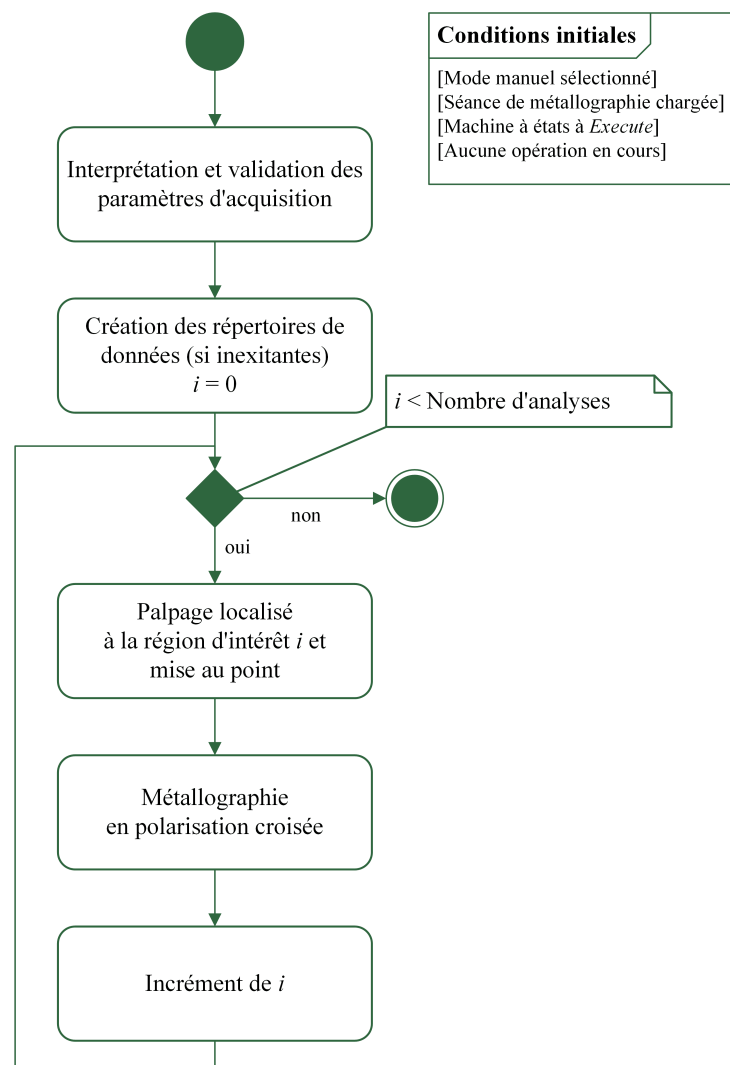


Figure F.1 Diagramme d'activité de la séquence de caractérisation de surface

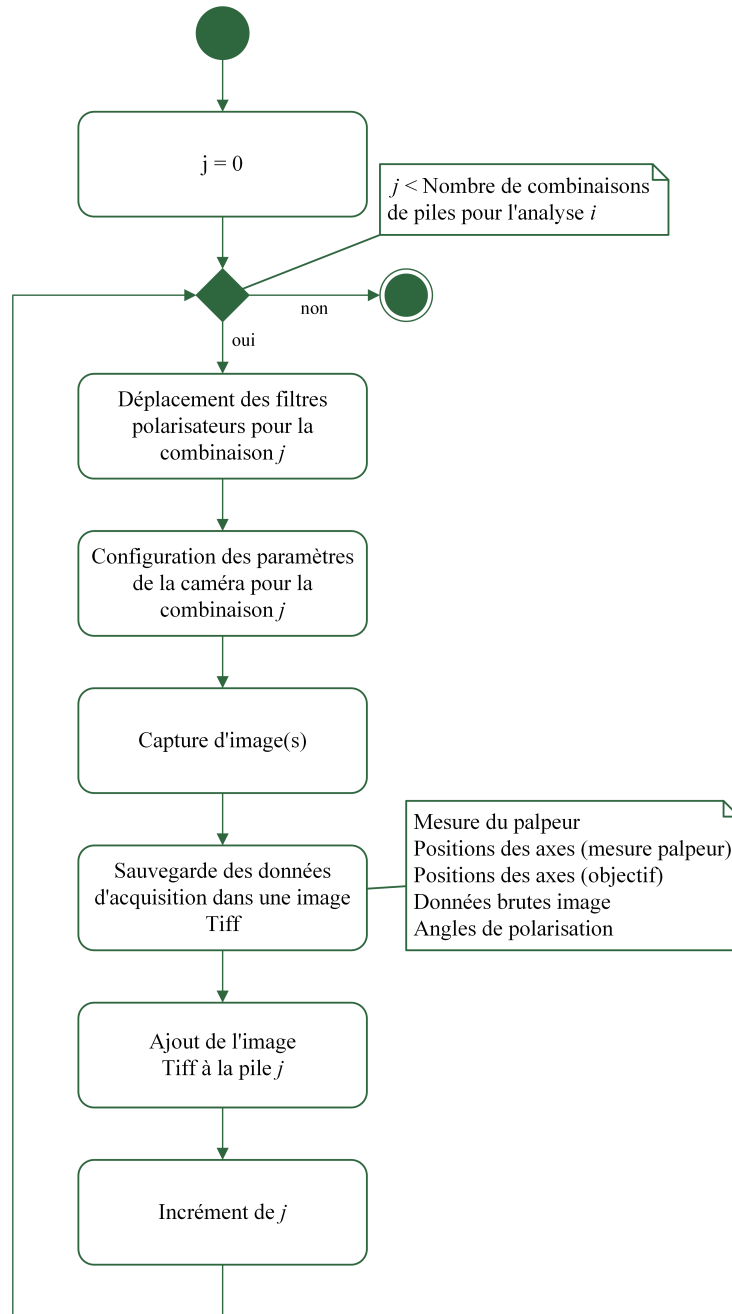


Figure F.2 Diagramme d'activité de la sous-séquence de métallographie en polarisation croisée



## F.2 Séquence automatisée de prépolissage et polissage

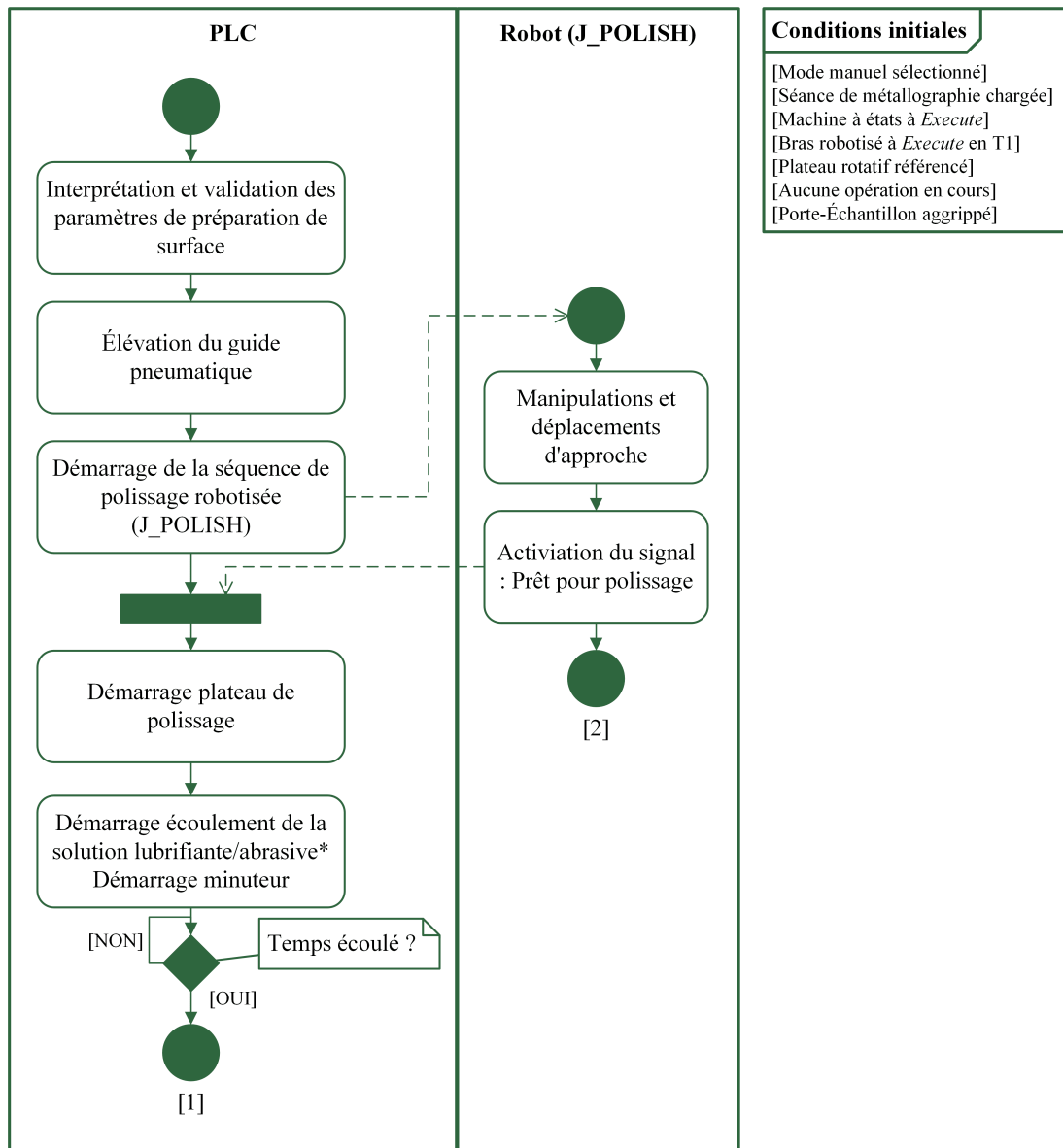


Figure F.3 Diagramme d'activité de la séquence de prépolissage et polissage (1 de 2)

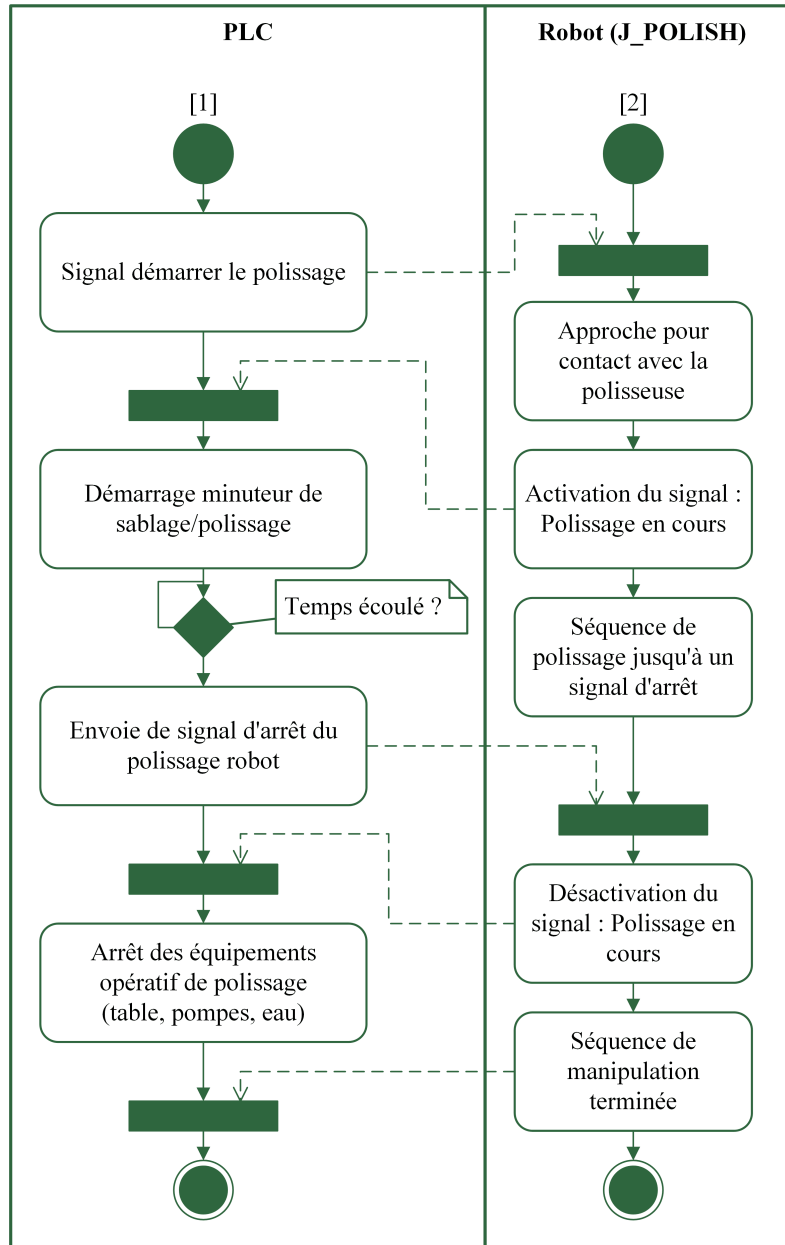


Figure F.4 Diagramme d'activité de la séquence de prépolissage et polissage  
(2 de 2)

### F.3 Séquence automatisée de nettoyage

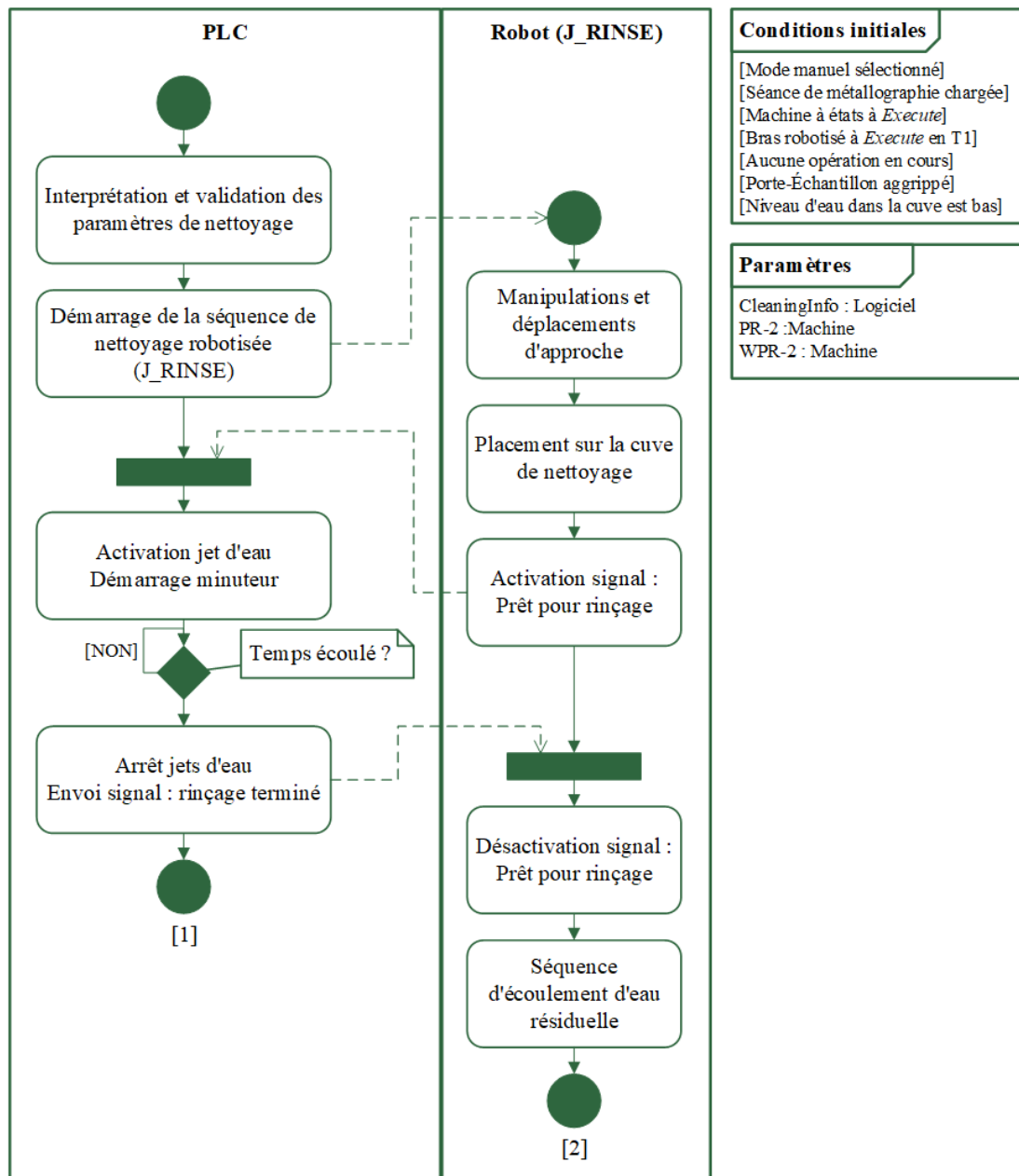


Figure F.5 Diagramme d'activité de la séquence de nettoyage (1 de 2)



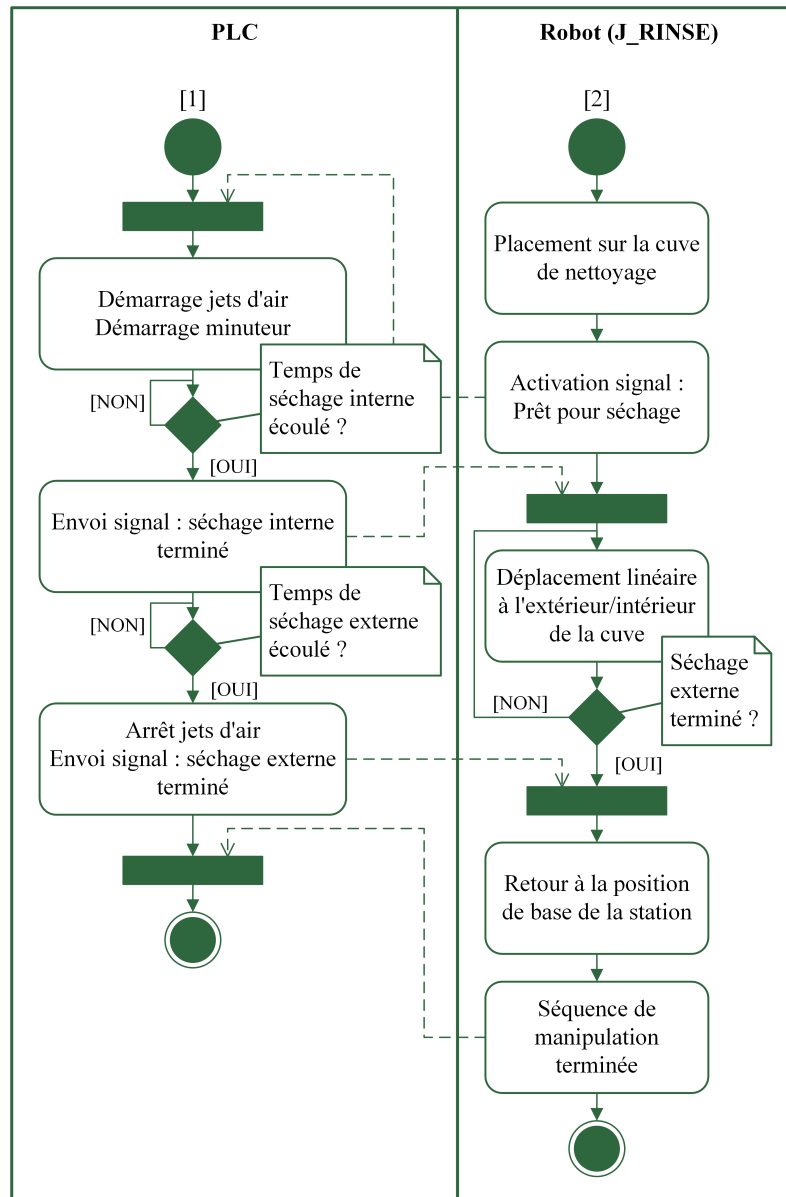


Figure F.6 Diagramme d'activité de la séquence de nettoyage (2 de 2)

## F.4 Séquences de manipulations robotisées

Les volets de cette section présentent les quatre principales séquences (*robot jobs*) de l'unité logique de manipulations robotisées. Chaque volet indique les différents paramètres et signaux utilisés par la séquence ainsi qu'une description textuelle.

### Séquences de saisie et placement du porte-échantillon (J\_PICK et J\_PLACE)

Paramètres :

- Décalage en millimètre du plateau du porte-échantillon par rapport à la position de référence de la station de caractérisation (REG[97])

Système de coordonnées : UFRAME[1]

**Séquence J\_PICK :**

1. Déplacement du robot à la position maison de la station de microscopie (H\_MICRO) ;
2. Validation que la pince est complètement ouverte ;
3. Évaluation de la position de décalage pour le dépôt du porte-échantillon sur le plateau du microscope selon REG[97] ;
4. Approche de la pince pneumatique de la position de prise ;
5. Déplacement à la position de prise ;
6. Fermeture de la pince et validation de la prise du porte-échantillon ;
7. Changement de la charge utile à P\_FULL ;
8. Retrait du porte-échantillon du microscope ;
9. Déplacement du robot à la position maison de la station de microscopie (H\_MICRO).

**Séquence J\_PLACE :**

1. Déplacement du robot à la position maison de la station de microscopie (H\_MICRO) ;
2. Validation que la pince agrippe bien le porte-échantillon ;
3. Évaluation de la position de décalage pour le dépôt du porte-échantillon sur le plateau du microscope selon REG[97] ;
4. Approche du porte-échantillon de la position de dépôt ;
5. Déplacement linéaire du porte-échantillon à la position de dépôt ;
6. Ouverture complète de la pince et validation du dépôt du porte-échantillon ;
7. Changement de la charge utile à P\_EMPTY ;
8. Retrait de la pince pneumatique de la position de dépôt ;
9. Déplacement du robot à la position maison de la station de microscopie (H\_MICRO).

**Séquence de polissage de l'échantillon (J\_POLISH)**

**Paramètres :**

- Longueur de l'échantillon en millimètre (REG[98])
- L'emplacement de l'échantillon dans le porte-échantillon (REG[34])
- Angle de départ de l'échantillon par rapport à la table de polissage (REG[99])
- Angle maximal de rotation dans le sens horaire par rapport à l'angle de départ (REG[100])
- Angle maximal de rotation dans le sens antihoraire par rapport à l'angle de départ (REG[101])
- Vitesse de rotation du poignet en pourcentage (REG[102])

**Signaux d'entrée :**

- Arrêt demandé (DOUT[160])
- Démarrage du polissage demandé (DOUT[161])

**Signaux de sorties :**

- Prêt pour polissage (DOUT[90])
- Polissage en cours (DOUT[93])

**Système de coordonnées :** UFRAME[2]

**Séquence 1 de 2 :**

---

1. Déplacement du robot à la position maison de la station de polissage (H\_POLISH) ;
2. Validation de la présence du porte-échantillon dans la pince ;
3. Approche du porte-échantillon au-dessus du support pneumatique ;
4. Déplacement du porte-échantillon à la position d'assise sur le support pneumatique (élevé) de la station et attente de 2 secs ;
5. Exécution de la séquence de polissage (séquence 2 de 2) ;
6. Déplacement du porte-échantillon à la position d'assise originale ;
7. Retrait du porte-échantillon du support pneumatique ;
8. Déplacement du robot à la position maison de la station de polissage (H\_POLISH).

**Séquence 2 de 2 :**

1. Sauvegarde de la position actuelle ;
2. Évaluation des positions de décalage pour le polissage (angle de départ, angle de fin, arc et vitesse) selon les paramètres spécifiés ;
3. Déplacement du poignet robot (J6) à l'angle de départ ;
4. Évaluation de la position de contact ;
5. Approche de l'échantillon du plateau de polissage ;
6. Activation du DOUT - Prêt pour le polissage ;
7. Attente du DOUT - Arrêt demandé ou DOUT - Démarrer le polissage ;
8. Désactivation du DOUT - Prêt pour le polissage ;
9. Début de la condition **skip** si DOUT - Arrêt demandé ;
10. Déplacement linéaire de l'échantillon à la position de contact sur le plateau de polissage (**skip**) ;
11. Activation du DOUT - Polissage en cours ;
12. Boucle 1 - Rotation du poignet (**skip**) :
  - (a) Déplacement du poignet robot dans le sens horaire de la table selon les paramètres calculés (**skip**) ;
  - (b) Déplacement du poignet robot dans le sens antihoraire de la table selon les paramètres calculés (**skip**) ;
13. Si DOUT - Arrêt demandé : continue ; sinon : retour à Boucle 1 ;
14. Fin de la condition **skip** ;
15. Désactivation du DOUT - Polissage en cours ;
16. Retrait linéaire de l'échantillon de la table de polissage ;

**Séquence de rinçage et séchage de l'échantillon (J\_RINSE)****Paramètres :**

- Longueur de l'échantillon en millimètre (REG[98])
- L'emplacement de l'échantillon dans porte-échantillon (REG[34])

**Signaux d'entrée :**

- Arrêt demandé (DOUT[160])
- Rinçage terminé (DOUT[163])
- Démarrer séchage (DOUT[164])

**Signaux de sortie :**

- Prêt pour rinçage (DOUT[92])
-

- Prêt pour séchage (DOUT[94])

**Système de coordonnées :** UFRAME[3]

**Séquence :**

1. Déplacement du robot à la position maison de la station de nettoyage (H\_CLEAN);
2. Validation de la présence du porte-échantillon dans la pince;
3. Approche du porte-échantillon de la position d'assise sur la cuve de nettoyage;
4. Déplacement linéaire du porte-échantillon à la position d'assise;
5. Activation du DOUT - Prêt pour le rinçage;
6. Attente du DOUT - Arrêt demandé ou DOUT - Rinçage terminé;
7. Désactivation du DOUT - Prêt pour le rinçage;
8. Retrait du porte-échantillon de la position d'assise;
9. Déplacement de va-et-vient de l'échantillon au-dessus de l'embouchure de la cuve pour l'égouttement de l'eau en surface;
10. Activation du DOUT - Prêt pour le séchage;
11. Attente du DOUT - Arrêt demandé ou DOUT - Démarrer séchage;
12. Désactivation du DOUT - Prêt pour le séchage;
13. Boucle 1 - Déplacement linéaire du porte-échantillon à l'extérieur et partiellement à l'intérieur de la cuve;
14. Si DOUT - Arrêt demandé : continue; sinon : retour à Boucle 1;
15. Retrait du porte-échantillon de la cuve;
16. Déplacement du robot à la position maison de la station de nettoyage (H\_CLEAN).

## ANNEXE G

# FONCTIONNALITÉS DU MÉTALLOGRAPHES 3D

D'un premier coup d'œil à la figure G.1, l'application visuelle du Metallograph Cockpit organise les différents composants du système en plusieurs contextes logiques. Entre autres, les onglets de navigation permettent de naviguer entre différents sous-systèmes de commandes qui, eux-mêmes, dévoilent d'autres sous-onglets et fonctionnalités. Lorsque le Métallographe 3D est opérationnel en mode manuel, l'utilisateur a la capacité de piloter les divers modules et sous-systèmes, selon les conditions logiques établies. Dans ce mode, l'utilisateur est contraint d'utiliser le terminal de programmation afin d'exécuter les séquences impliquant le bras robotisé (p. ex. sablage, polissage, nettoyage, etc.). Bref, les sections suivantes présentent brièvement les fonctionnalités de chacune des interfaces de contrôle du Metallograph Cockpit.

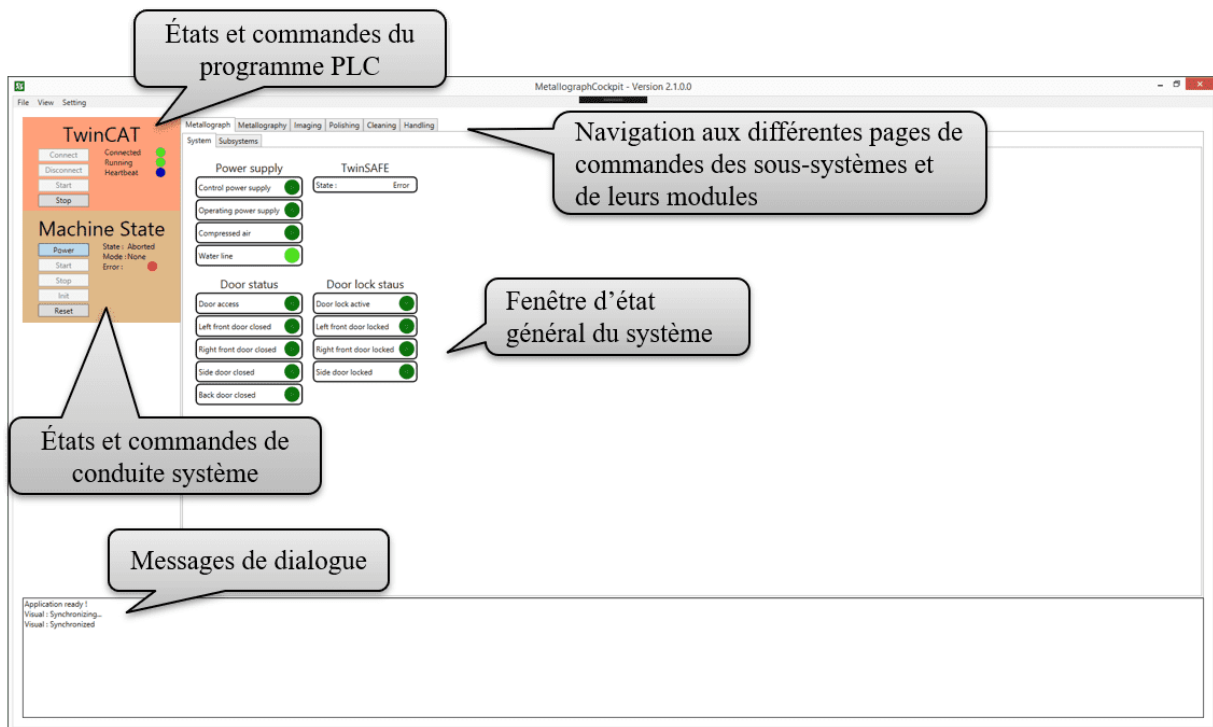


Figure G.1 Aperçu général de la composition de l'interface graphique du Metallograph Cockpit

### Métallographe (*Metallograph*)

À son côté de gauche, le Metallograph Cockpit affiche deux modules systèmes : TwinCAT et Machine à états (State Machine). Ces modules sont visibles et fonctionnels en permanence une fois l'application de commande démarrée. Quant à l'onglet Metallograph,

celui-ci contient deux sous-onglets : **System** et **Subsystem**. L'interface **System** contient plusieurs indicateurs visuels concernant l'état général des sources d'alimentation et éléments de sécurité de l'équipement. Par exemple, cette fenêtre indique :

- L'état actuel du programme de sécurité (voir tableau 4.1) ;
- L'état des sources d'alimentation opérative (p. ex. : si présence d'eau, d'air, d'énergie électrique de contrôle et de puissance) ;
- L'état des portes : si verrouillées et si ouvertes.

La page **Subsystems** donne des renseignements généraux de l'état des différents sous-systèmes de contrôle logique du Métallographe 3D. Chaque ligne indique si le sous-système correspondant est : activé, en opération (exécute un travail), en erreur/code d'erreur.

### **TwinCAT**

Le module de contrôle **TwinCAT** permet à l'utilisateur de :

- Se connecter/déconnecter au/du programme PLC ;
- Démarrer/arrêter le programme PLC ;
- Visualiser l'état du programme PLC : si connecté et en marche ;
- Visualiser le **Heartbeat**, un signal clignotant, aux ~2.5 sec, indiquant que la communication WPC-PLC est opérationnelle.

### **Machine à états (*State Machine*)**

Le module **State Machine** sert d'interface pour exécuter les opérations de conduite du système et de positionner automatiquement ce dernier à un état d'opération connu et ultimement à son état de marche (**Execute**) où il est possible de piloter la PO Avec ce module, l'utilisateur est capable de :

- Piloter le système à l'aide des boutons de conduite : **Power**, **Start**, **Stop**, **Init** et **Reset** (voir la section 4.1.5) ;
- Visualiser l'état machine du système actuel ;
- Visualiser le mode opérationnel sélectionné (automatique ou manuel).

### **Métallographie (*Metallography*)**

Cet onglet de l'application de commande regroupe les modules du sous-système logique de métallographie. C'est à partir de ce dernier qu'il est possible d'exécuter des séquences automatisées du cycle d'analyses métallographiques. Brièvement, les pages **Session**, **Parameter** et **Data Acquisition** de ce sous-système permettent à l'utilisateur de :

- Créer, charger et visualiser les paramètres d'une séance de métallographie ;
- Charger un fichier et visualiser les paramètres métallographiques ;
- Verrouiller et transférer les paramètres métallographiques ;
- Exécuter des séquences automatisées (uniquement en mode manuel) :
  - Séquence de saisie/placement du porte-échantillon à la station de caractérisation avec le bras manipulateur (**Pick** et **Place**) ;
  - Séquence de prépolissage/polissage avec le bras manipulateur (**Grind/Polish**) ;
  - Séquence de savonnage avec le bras manipulateur (**Wash**<sup>1</sup>) ;
  - Séquence de nettoyage avec le bras manipulateur (**Clean**) ;
  - Séquence de caractérisation de surface (**Data Acquisition**) ;
  - Séquence de mesure de surface (**Probing Acquisition**<sup>1</sup>).

## Station de caractérisation (*Imaging*)

Cet onglet de l'application de commande regroupe tous les modules de contrôle servant à piloter les composants fonctionnels de la station de caractérisation 2D. Celui-ci comprend plusieurs pages groupées par modules. Les sections suivantes présentent quelques fonctionnalités pour chacun de ces onglets.

### Axes linéaires X et Z (Microscope Axis)

Cette fenêtre sert d'interface de pilotage pour les moteurs pas-à-pas des axes linéaires du microscope (AXIS-X et AXIS-Z). Les positions de référence de ces axes moteurs forment les coordonnées cartésiennes (X-Z) des effecteurs OBJ, OBJ-F et Z-TIP. Pour chacun des moteurs, l'utilisateur est en mesure de :

- Visualiser la position (mm), la vitesse (mm/s) et les états du moteur : si activé, en erreur/code d'erreur, en mouvement et si la position est référencée (*homed*) ;
- Exécuter un déplacement relatif ou absolu ;
- Exécuter un déplacement continu à basse ou haute vitesse (vitesses préréglées et optimales) ;
- Exécuter un déplacement autoguidé à la position de référence (*homing*) ;
- Exiger un arrêt contrôlé.

### Filtres polariseur et analyseur (*Cage Rotators*)

Cette fenêtre sert d'interface de pilotage pour les moteurs rotatifs des filtres polarisants du microscope. Pour chacun des moteurs, l'utilisateur est en mesure de :

- Visualiser la position (°) et les états du moteur : si connecté, activé, en erreur/code d'erreur, en mouvement, et si la position est référencée (*homed*) ;
- Exécuter un déplacement relatif ou absolu ;
- Exécuter un déplacement relatif d'un pas prédéfini (15°) ;
- Exécuter un déplacement autoguidé à la position de référence (*homing*) ;
- Exiger un arrêt contrôlé ou momentané.

### Mesure de surface en Z (*Z-Probe*)

Cette fenêtre sert d'interface de pilotage pour le palpeur numérique et de ces composants réseautiques. À cette page, l'utilisateur est en mesure de :

- Visualiser les informations et états généraux du serveur, du réseau et du palpeur numérique Orbit ;
- Se connecter/déconnecter au serveur et réseau Orbit ;
- Sélectionner un mode de lecture : unités (mm) ou incréments d'encodeur (*count*) ;
- Effectuer une lecture échantillonnée et instantanée selon le mode sélectionné ;
- Démarrer/arrêter l'option de lecture en continu selon le mode sélectionné.

### Microscopie (*Microscopy*)

Actuellement, cette page possède uniquement deux boutons : **Open** et **Close**. Ces boutons servent à démarrer ou arrêter une fenêtre contextuelle amovible spécialement dédiée pour exécuter des fonctions, configurer des paramètres et afficher le flux d'images de la caméra numérique. Entre autres, cette fenêtre permet à l'utilisateur de :

---

1. Présentement désactivée et non terminée

---

- Visualiser les informations et états généraux de la caméra : si connectée, si en lecture continue, résolution, fps, etc. ;
- Démarrer/arrêter le visionnement en continu (max. 8 fps, spécifications de la caméra) ;
- Faire une capture d'image instantanée (une séance de métallographie doit être chargée pour l'enregistrer) ;
- Configurer certains paramètres de base : temps d'exposition, fréquence d'acquisition, etc. ;
- Ajuster la taille de la fenêtre de visualisation selon : la taille de l'écran, une échelle 1:2 ou une échelle 1:1 ;
- Activer/désactiver la superposition d'un réticule centré et ajusté à la taille de l'image affichée.

### Fonctions générales (*General*)

Cette fenêtre sert de centre de commandement pour la station de caractérisation. Elle regroupe les fonctions générales et celles qui impliquent l'usage de plusieurs modules de la station. Par exemple, l'utilisateur est capable de :

- Exécuter un déplacement simultané des axes moteurs X et Z (relatif ou absolue) ;
- Exécuter un déplacement simultané des filtres polariseurs (relatif ou absolue) ;
- Arrêter le déplacement des axes moteurs X et Z ;
- Arrêter le déplacement des filtres polariseurs ;
- Exécuter un déplacement selon l'axe Z en continu jusqu'à ce que la valeur cible du palpeur (0 à 0.5 mm) soit obtenue ou la limite de l'axe soit atteinte ;
- Exécuter une lecture du palpeur avec ajustement temporel (voir section 5.1.1) ;
- Exécuter un déplacement du plan focal (OBJ-F) par rapport à la dernière mesure du palpeur ajustée ;
- Exécuter une commande d'autoguidage du palpeur au centre (approximatif) de la Slot1<sup>2</sup> ou de la Slot2 et mise au foyer automatique ;
- Arrêter l'exécution de toutes commandes ou opérations de la station en cours ;
- Visualiser les informations utiles et états des commandes ;
- Entrer divers paramètres (p. ex. positions, distances, etc.) pour les commandes.

### Station de préparation de surface (*Polishing*)

Cet onglet de l'application de commande regroupe tous les modules de contrôle servant à piloter les composants fonctionnels de la station de préparation de surface. Celui-ci comprend trois sous-onglets, présentés ci-après : *General*, *Polishing Table* et *Peristaltic Pump*.

#### Fonctions générales (*General*)

Cette fenêtre sert à piloter les composants fonctionnels simples et à afficher divers états généraux de la station de préparation de surface. Par exemple, à cette page, l'utilisateur est capable de :

- Démarrer/arrêter l'écoulement d'eau sur le plateau de polissage (POL-PW) ;
- Élever/abaisser le support pneumatique mobile (POL-STMO) ;

---

2. La base motorisée du microscope doit être physiquement décalée pour pouvoir atteindre la Slot1. La fonction est désactivée pour cet emplacement.

---



- Visualiser si le plateau tournant du support pneumatique est à sa position de référence, si l'écoulement d'eau est en marche, etc.

### **Table de polissage (*Polishing Table*)**

Cette fenêtre sert à piloter la table de polissage. À cet onglet, il est possible de :

- Visualiser les états de la polisseuse : si activée, en déplacement, en erreur/code d'erreur ;
- Démarrer/arrêter la polisseuse indéfiniment ou pour un temps spécifique.

À l'heure actuelle, la vitesse du moteur de la polisseuse n'est pas ajustable, car les tests effectués avec celle-ci ont révélé que la commande moteur utilisée (DRV-1) était déjà, physiquement et électriquement, modifiée pour produire une unique vitesse. Malgré cela, les tests ont conclu que cette vitesse était largement satisfaisante pour les expérimentations et ceci a éliminé un paramètre du processus.

### **Pompes de lubrifiant et d'abrasif (*Peristaltic Pump*)**

Cette fenêtre sert à piloter les pompes péristaltiques de lubrifiant et d'abrasif liquide. Pour chaque pompe, l'utilisateur est capable de :

- Visualiser la vitesse ( $^{\circ}/\text{sec}$ ) et les états de la pompe : si activée, en mouvement, en erreur/code d'erreur ;
- Démarrer/arrêter la pompe ;
- Ajuster la vitesse ( $0^{\circ} - 180^{\circ}/\text{sec}$ ), soit le débit.

## **Station de nettoyage (*Cleaning*)**

Cet onglet de l'application de commande regroupe tous les modules de contrôle servant à piloter les composants fonctionnels de la station de nettoyage. Celui-ci comprend deux onglets : **General** et **Brush Motor**.

### **Fonctions générales (*General*)**

Cette fenêtre sert à piloter les composants fonctionnels simples et à afficher divers états généraux de la station de nettoyage. Par exemple, l'utilisateur est capable de :

- Démarrer/arrêter les jets d'air de la cuve de nettoyage ;
- Démarrer/arrêter les jets d'eau de la cuve de nettoyage ;
- Visualiser si le porte-échantillon est sur le dessus de la cuve, si la cuve de savonnage est en place, si les jets sont activés et en marche, etc.

Pour actionner les jets de la cuve, il faut que le système détecte la présence du porte-échantillon à l'embouchure de la cuve.

### **Brosse de nettoyage (*Brush Motor*)**

Cette fenêtre sert à piloter la brosse de nettoyage. Elle permet à l'utilisateur de :

- Visualiser les états de la brosse : si activée, en mouvement, en erreur/code d'erreur ;
- Démarrer/arrêter l'enrênement de la brosse ;
- Ajuster la vitesse de rotation ( $0 - 100\%$ ) de la brosse.

## **Station de manipulation (*Handling*)**

Cet onglet de l'application de commande regroupe tous les modules de contrôle servant à piloter les composants fonctionnels et l'unité logique du sous-système de manipulation.

---

Actuellement, tous les éléments sont groupés au sous-onglet **Robot**. Avec ce dernier, l'utilisateur est capable de :

- Piloter la machine à états de l'application robot : **Enable**, **Start**, **Stop**, **Reset** et **Abort** (voir la section [4.3.2](#)) ;
  - Visualiser l'état de la communication Modbus : si activée, en erreur, etc. ;
  - Visualiser l'état du bras robotisé : si activé, si en erreur, si arrêté à l'une de ces positions de référence, si la pince est ouverte/fermée, différentes E/S robot, etc.
-

# ANNEXE H

## PROCÉDURE DE MÉTALLOGRAPHIE 3D

Cette annexe détaille la procédure pour pratiquer une expérience d'analyses métallographiques 3D avec le Métallographe 3D en mode manuel. Pour des raisons de simplification, les procédures de cette annexe emploient un ton impératif à la deuxième personne. De plus, des commentaires, annotés par le symbole ☞, sont introduits entre certaines étapes dans le but de fournir quelques informations utiles.

Avant d'exercer ces démarches, il est fortement conseillé de lire au complet celles-ci pour prendre connaissance des subtilités du système. Au préalable, il est également important de regarder les différents sous-systèmes et composants fonctionnels du Métallographe 3D en consultant les annexes [A](#), [C](#) et [D](#).

### H.1 Réalisation d'une expérience d'analyses métallographiques 3D

Les étapes de cette section donnent les lignes directrices à suivre pour réaliser une séance d'analyses métallographiques 3D. Cette démarche compte quatre phases : 1) phase de démarrage ; 2) phase de préparation de surface initiale ; 3) phase de coupes en série et métallographie ; 4) phase de fermeture.

#### 1. Phase de démarrage :

- 1.1. Démarrez le Métallographe 3D en suivant la procédure [H.2 - Mise en marche du Métallographe 3D](#) ;
- 1.2. Une fois l'équipement fonctionnel, poursuivez avec les procédures préparatoires :
  - [H.3 - Préparation de l'échantillon et du porte-échantillon](#) ;
  - [H.4 - Paramétrisation initiale d'une séance de métallographie](#) ;
- 1.3. Chargez et verrouillez les paramètres métallographiques en cliquant sur le bouton Lock à la page Metallography → Data Acquisition du Metallograph Cockpit ;
- 1.4. Déposez le porte-échantillon à la station de caractérisation comme indiqué aux premières étapes de la procédure [H.4](#) ;

☞ À cette étape-ci, si le robot n'a pas le porte-échantillon, seul le bouton Pick sera activé. Si au contraire, le robot agrippe le porte-échantillon, alors les boutons Place, Grind, Polish et Clean seront déverrouillés. Quant à la fonction de caractérisation automatisée (Manual Data Acquisition), celle-ci est disponible dès que les paramètres métallographiques sont verrouillés. De plus, il n'est pas nécessaire d'activer le système de manipulation pour démarrer cette séquence-ci.

#### 2. Phase de préparation de surface initiale :

- 2.1. Exécutez la séquence de saisie du porte-échantillon ([H.1.1](#)) ;

- 2.2. Exécutez la séquence de prépolissage en débutant avec un papier rugueux #600 ou #800 ([H.1.2](#));
- 2.3. Exécutez la séquence de nettoyage ([H.1.3](#));
- 2.4. Exécutez la séquence de placement du porte-échantillon ([H.1.1](#));
- 2.5. Inspectez le résultat de l'étape précédente à la station de caractérisation pour s'assurer que l'échantillon a été sablé ou poli sur toute sa surface :
  - Si c'est le cas, poursuivez à la prochaine étape;
  - Si ce n'est pas le cas, répétez les étapes depuis l'étape **2.1**;
- 2.6. Répétez les étapes depuis l'étape **2.1** mais cette fois-ci avec un papier plus fin que la séance de prépolissage précédente jusqu'à ce que vous arriviez à un papier #1200;
- 2.7. Après le prépolissage, répétez encore les étapes de **2.1** à **2.5**, mais cette fois-ci en effectuant un polissage de 3 µm suivi d'un de 0.25 µm en suivant la démarche [H.1.4 - Polissage automatisé](#);
- 2.8. Calibrez le sous-système de caractérisation pour la mise au foyer automatique en suivant la procédure [H.1.5 - Calibration de la position relative des effecteurs de caractérisation](#).

La série d'étapes de la prochaine phase présente l'ordre séquentiel en cas d'utilisation normale. Au besoin, il est faisable de répéter l'une de ces étapes pour ajuster les paramètres métallographiques ou reprendre les activités ultérieurement.

### 3. Phase de coupes en série (cycle d'analyses métallographiques) :

- 3.1. Exécutez la séquence de saisie du porte-échantillon ([H.1.1](#));
- 3.2. Exécutez un enlèvement de matière avec un polissage à 3 µm ([H.1.4](#));
- 3.3. Exécutez la séquence de nettoyage ([H.1.3](#));
- 3.4. Exécutez la séquence finition de surface avec un polissage à 0.25 µm ([H.1.4](#));
- 3.5. Exécutez la séquence de nettoyage ([H.1.3](#));
- 3.6. Exécutez la séquence de placement du porte-échantillon ([H.1.1](#));
- 3.7. Exécutez la séquence de caractérisation automatisée ([H.1.6](#));
- 3.8. Répétez les étapes depuis l'étape **3.1** pour le nombre de cycles ou coupes désiré.

### 4. Phase de fermeture :

- 4.1. Copiez votre projet de métallographie dans le dossier de la séance métallographique (p. ex. 3D Metallography/SessionName);
- 4.2. Mettez hors route le Métallographe 3D en suivant la procédure [H.8 - Mise hors route du Métallographe 3D](#).

## H.1.1 Saisie et placement automatique du porte-échantillon

Suivez ces étapes pour exécuter la saisie automatique du porte-échantillon à la station de caractérisation :

1. Activez le bras manipulateur en suivant la procédure [H.5](#);
  2. Appuyez sur le bouton **Pick** pour démarrer la séquence;
  3. Attendez que l'opération se termine et que le robot retourne à sa position de repos devant la station de caractérisation.
-

Pour exécuter le placement automatique du porte-échantillon à la station de caractérisation, suivez la même procédure ci-dessus mais avec la fonction **Place**.

### H.1.2 Prépolissage automatisé

Suivez ces étapes pour effectuer exécuter une séquence de sablage ou prépolissage :

1. Suivez la procédure [H.6 - Préparation pour le prépolissage](#) ;
2. Ajustez et chargez les paramètres de prépolissage au besoin (**Polishing**) ;
3. Activez le bras manipulateur en suivant la procédure [H.5](#) ;
4. Démarrez la séquence automatisée de prépolissage en cliquant sur le bouton **Grind** ;
5. Attendez que l'opération se termine et que le robot retourne à sa position de repos devant la station de polissage.

### H.1.3 Nettoyage automatisée

Suivez ces étapes pour exécuter une séquence de nettoyage :

1. Ajustez et rechargez les paramètres de nettoyage au besoin (**Cleaning**) ;
2. Activez le bras manipulateur en suivant la procédure [H.5](#) ;
3. Démarrez la séquence de nettoyage en cliquant sur le bouton **Clean** ;
4. Attendez que l'opération se termine et que le robot retourne à sa position de repos devant la station de nettoyage.

☞ Pour votre confort, il vous est fortement suggéré de porter des protecteurs auditifs tels que des bouchons pour les oreilles, car le processus de séchage est plutôt assourdissant.

### H.1.4 Polissage automatisé

Suivez ces étapes pour exécuter une séquence de polissage :

1. Installez la matière d'œuvre pour le polissage en suivant la procédure de préparation [H.7 - Préparation pour le polissage](#) ;
2. Ajustez et chargez les paramètres de polissage au besoin (**Polishing**) ;
3. Activez le bras manipulateur en suivant la procédure [H.5](#) ;
4. Démarrez la séquence automatisée de polissage en cliquant sur le bouton **Polish** ;
5. Attendez que l'opération se termine et que le robot retourne à sa position de repos devant la station de polissage.

### H.1.5 Calibration de la position relative des effecteurs de caractérisation

Cette procédure fonctionne uniquement si l'échantillon a un état de surface suffisamment plane (polissage à 0.25  $\mu\text{m}$ ). Pour ajuster la mise au point automatique du microscope, suivez ces étapes :

1. Exécutez la fonction **Auto Focus Slot 2** à la page **Imaging** → **General** ;
  2. Attendez que la séquence se termine ;
  3. À l'aide de l'outil de visualisation, vérifiez que l'image rendue est nette, c.-à-d. que la mise au point est bonne :
    - Si la mise au point est bonne la procédure se termine ici ;
    - Dans le cas contraire, poursuivez à la prochaine étape ;
  4. Notez la position actuelle en Z ( $Z_i$ ) ;
-

5. Déplacez manuellement, à faible vitesse, l'axe Z du microscope jusqu'à ce que l'image devienne nette à l'aide de l'application de commande ;
6. Notez la nouvelle position de l'axe Z ( $Z_f$ ) ;
7. Soustrayez la position de l'étape 4 à celle de l'étape 6 ( $\Delta Z = Z_f - Z_i$ ) ;
8. Déconnectez le programme PLC (Logout) ;
9. Dans le projet PLC, ouvrez le fichier 00\_State/GVLs/GVL\_COORD ;
10. Ajoutez  $\Delta Z$  à la valeur de `stObj_Probe.Z` ;
11. Soustrayez  $\Delta Z$  à la valeur de `stProbe_Obj.Z` ;
12. Redémarrez le système en suivant les étapes de la procédure [H.2 - Mise en marche du Métallographe 3D](#) ;
13. Testez à nouveau la fonction `Auto Focus Slot 2` pour valider que le système réussit à faire une mise au point acceptable.

### H.1.6 Caractérisation de surface automatisée

Suivez ces étapes pour exécuter une séquence de caractérisation automatisée :

1. Assurez-vous d'avoir bien régler vos paramètres de caractérisation (`Acquisition`) ;
2. Exécutez la séquence de caractérisation en cliquant sur le bouton `Start` sous l'entête `Manual Data Acquisition` du `Metallograph Cockpit` ;

☞ Pour ne pas corrompre vos données ou pour re-exécuter la séquence, il est judicieux de copier vos données actuelles dans un dossier différent avant chaque séance de caractérisation automatisée. Les images et données acquises lors de la séquence s'empilent automatiquement aux piles d'images déjà existantes.

## H.2 Mise en marche du Métallographe 3D

Avant d'effectuer toutes opérations, il faut toujours vérifier que l'équipement est correctement branché aux sources d'énergie externes et que les dispositifs et protecteurs de sécurité sont en place (capteurs, portes, cuve de rétention d'eau, etc.). Pour mettre la machine en marche, suivez la procédure suivante :

1. Engagez les source d'énergies externes :
  - Alimentation électrique ;
  - Alimentation en air comprimé ;
  - Alimentation en eau ;
2. Actionnez les commandes principales pour mettre le système sous énergie :
  - Le sectionneur électrique principal (DISC-1) ;
  - La valve principale d'entrée d'eau (WV-1) ;

☞ Une fois le sectionneur principal actionné (contact fermé), les voyants lumineux blanc LT-1 et LT-2 s'allument. Ceux-ci indiquent que la machine est sous-tension. De plus, cette action alimente et démarre automatiquement l'ordinateur embarqué (PLC) ainsi que l'électrovalve principale d'air comprimé (DV-1). Consultez les figures [H.1](#) à [H.5](#) pour une aide visuelle au besoin.

3. Poursuivez avec la procédure [H.2.1 - Réarmement du Métallographe 3D](#) ;
4. Poursuivez avec la procédure [H.2.2 - Démarrage des applications de contrôle](#) ;

5. Poursuivez avec la procédure [H.2.3 - Démarrage du mode d'opération manuel](#).

☞ Une fois ces étapes complétées, il est possible d'utiliser le **Metallograph Cockpit** pour piloter l'équipement et réaliser une séance d'analyses métallographiques 3D. Poursuivez avec la procédure [H.1](#).

### H.2.1 Réarmement du Métallographe 3D

Pour armer la machine, suivez cette procédure :

1. Désengagez tous les arrêts d'urgence de la machine :
  - Stations à boutons (EMO-1, EMO-2 et EMO-3) ;
  - Panneau opérateur robot (RJ3-OP-EMO) ;
  - Terminal de programmation robot (RJ3-TP-EMO) ;
2. Appuyez sur le bouton bleu de réarmement (PB-1).

☞ Si l'opération réussit, le bouton PB-1 s'éteint. Si la machine n'est pas armée, le voyant lumineux de PB-1 reste allumé. Une fois la machine armée, les unités de communication et tous les composants connectés à la ligne d'alimentation PS-EMO deviennent opérationnels. Pour localiser les IHM, consultez les figures [H.4](#), [H.5](#) et [H.6](#) au besoin.

### H.2.2 Démarrage des applications de contrôle

À partir du moment que l'ordinateur embarqué (PLC) a terminé son démarrage :

1. Démarrez la tâche PLC :
  - 1.1. Ouvrez le projet TwinCAT **Metallograph-v3.x** (3.x étant la dernière version) ;
  - 1.2. Changez le mode de l'environnement TwinCAT de **Config** à **Run** ;
  - 1.3. Chargez le programme PLC en sélectionnant le projet **PLC\_Metallograph** et en cliquant sur le bouton **Login** de l'environnement TwinCAT ;

☞ Une fois le programme PLC chargé, il ne faut pas le démarrer, l'application PC va s'en occuper.

2. Démarrez l'application Robot :
  - 2.1. Démarrez le contrôleur robot en appuyant sur le bouton vert **ON** du panneau de contrôle opérateur robot (RJ3-OP) ;
  - 2.2. Attendez que le contrôleur ait terminé son démarrage. L'application robot démarre automatiquement lors de l'amorçage du contrôleur. Un message **MODBUS STARTED** sur le Terminal de programmation (RJ3-TP) s'affiche lorsque l'application robot aura démarré, indiquant que le serveur Modbus est fonctionnel et prêt à l'emploi ;

☞ Il faut compléter la procédure d'armement du Métallographe 3D pour démarrer le contrôleur robot. Le déclenchement d'un arrêt d'urgence provoque la coupure de l'alimentation de tout le système robot, incluant le contrôleur Fanuc R-J3.

3. Démarrez l'application PC :
  - 3.1. Lancez l'application **Presentation.MetallographCockpit.exe** par le biais de VS15 ou depuis le dossier de compilation du projet : **MetallographCockpit/Me**

`tallographCockpit.Presentation/bin/Debug`. Ce dernier démarre automatiquement l'application graphique et les sous-processus nécessaires à son fonctionnement ;

4. Vérifiez que les trois modules de contrôle (PLC, PC et RJ3-CTRL) sont bien connectés au commutateur Ethernet (SW-ETH) ;
5. Branchez les câbles de service des commutateurs Ethernet (SW-ETH) et USB (SW-USB) à l'ordinateur de commande (PC) ;
6. Vérifiez que les paramètres réseaux des unités de contrôle (PLC, PC et Robot) et des *routes ADS* de TwinCAT du PC et du PLC sont correctement configurés ;
7. Vérifiez que la caméra numérique est bien configurée sur le même réseau que l'équipement.

☞ Consultez au besoin la documentation TwinCAT [50] ou *FANUC R-J3 Controller Internet Options Setup and Operations Manual*. Utilisez l'outil d'assistance *IDS Camera Manager* pour vérifier ou assigner une adresse IP statique à la caméra selon le masque réseau du système.

### H.2.3 Démarrage du mode d'opération manuel

1. Sélectionnez les modes d'opération [voir les figures H.4 et H.6] :
  - Positionnez l'interrupteur à clé du cabinet robot à T1 (RJ3-OP-MODE) ;
  - Positionnez l'interrupteur à clé de la machine à Manuel (KS-1) ;
2. À l'aide du **Metallograph Cockpit** :
  - 2.1. Connectez l'application Windows au programme PLC en cliquant sur le bouton **Connect** du module **TwinCAT** ;
  - 2.2. Démarrez le programme PLC en cliquant sur le bouton **Start** du module **TwinCAT** ;

☞ Une fois le programme PLC démarré, celui-ci lance automatiquement le mécanisme d'auto-enregistrement et de synchronisation avec l'application PC. Lorsque le programme a terminé son opération, les éléments visuels du **Metallograph Cockpit** s'activent et un message s'affiche à la console de l'application indiquant que la synchronisation est terminée (**Visual : Synchronized**).

3. Cliquez sur le bouton **Power** du module **State Machine** ;

☞ Cette opération active tous les modules et sous-systèmes (activation globale) et alimente tous les composants non dangereux (capteurs, certaines commandes moteurs, etc.). Le système démarre toujours à l'état **Aborted**. La désactivation du bouton **Power** entraîne automatiquement le système vers l'état transitoire **Aborting**.

4. Assurez-vous que les portes supérieures de la machine sont proprement fermées, sans quoi la prochaine étape échouera ;
5. Cliquez sur le bouton **Reset** du module **State Machine** ;

☞ Cette opération est principalement la plus complexe du système et la plus susceptible d'échouer. En bref, celle-ci s'occupe de reconnaître et effacer toutes les erreurs des



modules et sous-systèmes fonctionnels. Elle s'occupe également de rétablir les communications et relancer l'application de sécurité. Lorsque les modules sont opérationnels et sont à un état de repos ou d'arrêt normal, la fonction poursuit avec l'activation de l'énergie opérative par l'intermédiaire de l'interface de sécurité. Si toutes ces opérations réussissent, le système change à l'état **Stopped**. Si au contraire, un module logique échoue ou génère une nouvelle faute, le système change à l'état **Aborting**. À partir du moment que l'équipement a complété son **Reset**, tous les composants opératifs sont alimentés et peuvent fonctionner normalement. À ce propos, il est intéressant de savoir qu'une fois cette étape franchie, l'utilisateur est en mesure de piloter le bras manipulateur à l'aide du TP indépendamment de l'application de commande.

6. Continuez en cliquant sur le bouton **Init** ;

☞ Cette séquence s'occupe d'initialiser les composants du système qui sont dans un état inconnu ou nécessite une calibration. Par exemple, si les axes moteurs ou filtres polariseurs du système de caractérisation ne connaissent pas leurs positions de référence, alors ceux-ci exécutent leurs fonctions d'autoguidage (*homing*). Seul le bras manipulateur ne s'initialise pas en mode manuel. Lorsque la séquence a terminé, le système change à l'état **Idle**.

7. Finalement, cliquez sur le bouton **Start**.

☞ En mode manuel, cette séquence ne fait rien de significatif. À la fin de celle-ci, les différentes commandes de pilotage du système se déverrouillent et le système s'opère normalement.

## H.3 Préparation de l'échantillon et du porte-échantillon

Pour analyser un échantillon avec le Métallographe 3D, celui-ci doit correspondre aux spécifications énoncées au tableau 3.1 et à l'annexe A.2. Initialement, les faces circulaires de l'échantillon doivent être relativement planes et parallèles pour simplifier l'installation et la phase de préparation de surface initiale. Avant d'installer l'échantillon dans le porte-échantillon :

1. Ébavurez le contour circulaire de la surface de l'échantillon à analyser. Cette étape est importante pour éviter d'user ou d'endommager les tapis et papiers abrasifs durant un prépolissage ou polissage ;
2. Mesurez l'épaisseur de l'échantillon (hauteur du cylindre). Prenez cette mesure en millimètre avec une précision minimale d'un dixième de millimètre ( $\pm 0.1$  mm). Conservez cette valeur, le système a besoin de cette donnée comme paramètre métallographique ;
3. Installez l'échantillon dans le porte-échantillon :
  - 3.1. Choisissez l'emplacement de travail du porte-échantillon : *Slot1* ou *Slot2* (voir la figure H.7) ;
  - 3.2. Alignez l'échantillon pour que l'axe horizontal de la composante électronique soit parallèle à l'axe central de la patte 1 du porte-échantillon (trait pointillé rouge) et que le dessus de la puce (indiqué par la flèche rouge) soit en direction des pattes 1 et 2 (figure H.7b) ;

- 3.3. Vérifiez que l'échantillon soit bien assis dans le fond du porte-échantillon et solidement fixé pour qu'il ne puisse plus bouger ;
4. Ajustez le plan de la surface de l'échantillon à l'aide des vis micrométriques (MAN-MS1, MAN-MS2, et MAN-MS3) du porte-échantillon (figure H.7a). Actuellement, il n'y a pas de stratégie pour proprement orienter ce plan.

☞ En raison de contraintes mécaniques des axes du microscope, seul l'emplacement 2 (*Slot2*) est approprié pour la caractérisation.

## H.4 Paramétrisation initiale d'une séance de métallographie

Pour exécuter des séquences automatisées, il faut obligatoirement fournir au système un minimum de paramètres. D'abord, installez le porte-échantillon à la station de caractérisation :

1. Ouvrez la porte latérale (PRO-LD) pour accéder à la station de caractérisation (l'ouverture des portes est possible en mode manuel même si la machine est en marche) ;
2. Déposez le porte-échantillon sur le support isostatique avec les pattes orientées comme indiqué aux figures H.7 et H.8 ;
3. Positionnez manuellement l'axe Y pour aligner le plan de l'échantillon avec l'axe optique du microscope :
  - 3.1. À l'aide des vis micrométriques ADJ-YP et ADJ-YN, déplacez le plateau pour apercevoir la région d'intérêt dans le champ optique du microscope ;
  - 3.2. Une fois en place, serrez suffisamment les vis pour que la plaque mobile Y ne puisse plus bouger ;
4. Mesurez le décalage de l'axe selon les marqueurs de référence, en millimètre et avec une précision minimale d'un dixième de millimètre ( $\pm 0.1$  mm) [voir la figure H.8]. Conservez cette valeur, elle est nécessaire comme paramètre métallographique (`MicroscopePickOffset`).

☞ Pour le positionnement de l'axe Y, utilisez les commandes d'axes moteurs et l'outil de visualisation du **Metallograph Cockpit** pour déplacer l'objectif du microscope et localiser la région d'intérêt plus facilement. La fonction `Auto focus slot 2` à l'onglet **Imaging** → **General** permet de positionner automatiquement l'objectif approximativement au foyer et au centre de l'échantillon lorsque le décalage de la plaque est nulle. Cette fonction constitue un excellent moyen pour positionner l'objectif près de son champ de vue nominal. En ajustant l'axe Z de quelques microns, il est possible d'obtenir rapidement une image nette de la surface de l'échantillon.

☞ Pour un ajustement précis, servez-vous des vis micrométriques contre les parois de serrage et vissez ou dévissez selon la direction pour contrôler les déplacements le long de l'axe par incrément microscopique.

Pour sauvegarder les données et paramètres métallographiques, il faut créer ou ouvrir une session de métallographie :

5. Dans le **Metallograph Cockpit**, dirigez-vous à la page **Metallography** → **Session** ;
6. Cliquez sur **New** ou **Open** pour créer une nouvelle session ou pour en charger une déjà existante ;
7. Suivez les instructions demandées ;

☞ Lorsque la session est chargée dans l'application, les pages **Session** et **Parameter** affichent les principaux paramètres configurés. Par défaut, les nouvelles sessions sont sauvegardés dans le dossier `/User/Document/3D Metallograph`.

Une fois la mise en plan effectuée et la session chargée, continuez avec les étapes suivantes. Au besoin, consultez la figure [H.9](#) qui montre un exemple de fichier de paramètres métallographiques.

8. Pilotez la station de caractérisation (**Imaging**) pour :
  - 8.1. Localiser les C4 ou régions d'intérêt ;
  - 8.2. Prenez en note la position de l'axe X de chaque d'eux (en mm) ;
  - 8.3. Déterminer les paires d'angles des filtres polariseurs (*polarizer* et *analyzer*) et le temps d'exposition subséquent pour chaque région désirée ;
9. Dans le fichier de paramètres de la séance métallographique actuelle, entrez manuellement :
  - Les paramètres d'acquisition à la balise **Acquisition** ;
  - L'emplacement de travail de l'échantillon dans le porte-échantillon **WorkingSlot** sous la balise **SampleHolder** ;
  - La longueur initiale de l'échantillon **InitialSampleLength** sous la balise **SampleHolder** ;
  - Le décalage mesuré à l'étape 4 **MicroscopePickOffset** sous la balise **Handling** ;
  - Les paramètres de préparation de surface sous la balise **Polishing** ;
  - Les paramètres de nettoyage sous la balise **Cleaning** ;
10. Chargez les nouveaux paramètres dans l'application : **Metallography** → **Parameters** → **Load**.

☞ Chaque région d'analyse possède une liste (**StackInfo**) de paramètres de caractérisation (**StackAcquisitionInfo**). Chaque ensemble de paramètres définit une pile d'images avec des métadonnées unique. Par exemple, c'est à cet endroit que vous pouvez spécifier toutes les combinaisons de polarisations que vous souhaitez effectuer à chaque coupe. Pour simplifier la saisie des paramètres d'acquisition, la page **Metallography** → **Parameter** contient le bouton **Add sample** qui ajoute automatiquement une nouvelle section de paramètres pour une région d'intérêt (**MetallographySampleInfo**) au fichier de paramètre. Vous pouvez configurer cette nouvelle section selon vos exigences. À titre indicatif, la section pour configurer la technique de palpé (Probing) n'est pas utilisée, elle reflète une fonctionnalité envisagée, mais non réalisée. Par défaut, le système utilise la technique de palpé discutée au chapitre [5.1.1](#).

## H.5 Utilisation du bras manipulateur en mode manuel

Pour exécuter une séquence automatisée impliquant le bras manipulateur en mode manuel, vous devez obligatoirement avoir le terminal de programmation dans vos mains. De plus, vous devez manuellement opérer la machine à états de l'application robot, à l'aide de l'application PC, pour autoriser ce dernier à se déplacer. Pour activer le robot, suivez la procédure suivante :

1. Empoignez le TP dans l'une de vos mains ;
2. Activez la manette en positionnant l'interrupteur (RJ3-TP-EBL) à ON (figure [H.6](#)) ;
3. Maintenez l'un des deux **Dead man's switch**, situés derrière la manette, à sa position de mi-course ;

☞ Le TP possède deux **Dead man's switch**. Ces boutons ont trois positions logiques : complètement relâchée, mi-course et complètement enfoncée. Le relâchement ou l'enfoncement complet de l'un de ces boutons cause l'arrêt immédiat du bras manipulateur et engage les freins des servomoteurs (certains axes). En mode manuel, T1 ou T2, il est impossible de déplacer le robot sans le TP.

4. Dirigez-vous à la page **Handling** → **Robot** du **Metallograph Cockpit** ;
5. Assurez-vous que la communication Modbus est fonctionnelle à l'aide des indicateurs Modbus de l'application de commande ;
6. Cliquez sur le bouton **Enable**. Celui-ci devrait se déverrouiller automatiquement si les étapes précédentes sont adéquatement exécutées ;
7. Cliquez sur le bouton **Reset** ;

☞ Cette action réinitialise et efface les erreurs du contrôleur robot. Si l'opération réussit, les contacteurs principaux du cabinet robot s'activent et alimentent les servomoteurs du bras articulé. Le bouton **Start** s'active.

8. Cliquez sur le bouton **Start**.

☞ Si le **Dead man's switch** est relâché lors d'une séquence ou une opération, l'application robot change automatiquement à sa séquence d'arrêt d'urgence (**Aborting**). Dans cette situation, vous devez recommencer cette procédure depuis le début. Si le robot s'arrête à une position autre que l'une de ces positions maison, il va falloir repositionner ce dernier manuellement à l'une de ces positions. Pour ce faire, il faut détenir un certain savoir-faire. Cette procédure n'est pas donnée dans ce mémoire et il est conseillé à l'utilisateur de demander l'aide à une personne qualifiée si nécessaire.

☞ Pour récupérer le porte-échantillon dans la pince préhension, suivez la procédure [H.5.1](#) - [Récupération du porte-échantillon dans la pince de préhension](#).

### H.5.1 Récupération du porte-échantillon dans la pince de préhension

Pour cette opération, vous n'avez pas besoin de maintenir le **Dead man's switch**. Pour récupérer le porte-échantillon, suivez ces étapes sur le TP :

1. Activez le TP (**Enable** - ON) ;
-

2. Cliquez sur le bouton I/O ;
3. Appuyez sur la touche F1 - [Type] ;
4. Sélectionnez l'option Robot ;
5. Cliquez sur la touche F3 - IN/OUT pour afficher la page I/O Robot Out ;
6. Naviguez le curseur sur la sortie R0[1] ;
7. Appuyez sur la touche F4 - ON ce qui provoque l'ouverture la pince.

⚠ **ATTENTION** : Assurez-vous de tenir le porte-échantillon avant d'actionner la pince sinon celui-ci va tomber au sol et potentiellement endommager l'équipement ou lui-même.

## H.6 Préparation pour le prépolissage

La séquence de prépolissage du Métallographe 3D sert principalement à aplanir la surface de l'échantillon pour que celle-ci soit parallèle au plateau de polissage et au plan d'analyse du système de caractérisation. Avant d'exécuter la séquence de prépolissage, il faut manuellement préparer la station. Pour ce faire, suivez la démarche suivante :

1. Actionnez le bouton pour élever le support pneumatique : **Polishing → General → Polishing tray → On** ;
2. Vérifiez que rien ne gêne le plateau de polissage et retirez la matière d'œuvre si présente ;
3. Rincez et essuyez la surface et le support de maintien du plateau de polissage ;
4. Démarrez le plateau de polissage : **Polishing → Polishing Table → Start**) ;
5. Mouillez la surface du plateau de polissage :
  - 5.1. Actionner l'écoulement de l'eau : **Polishing → General → Water flow → On** ;
  - 5.2. Attendre que la surface du plateau soit suffisamment mouillée (dix à quinze secondes) ;
  - 5.3. Arrêtez l'écoulement d'eau : **Polishing → General → Water flow → Off** ;
6. Arrêtez le plateau de polissage : **Polishing → Polishing Table → Stop** ;
7. Placez le papier abrasif désiré (p. ex. #800) sur le plateau de polissage ;
8. Installez le support de fixation par dessus le papier et vérifiez qu'il est bien placé ;
9. Répétez les étapes 4 à 6 pour mouiller le papier abrasif ;
10. Modifiez les paramètres de prépolissage du fichier de paramètre (**Polishing**) ;
11. Rechargez le fichier de paramètres dans l'application si vous les avez modifiés ;
12. Tournez manuellement le plateau rotatif (POL-PLRO) du support pneumatique pour aligner les deux entailles de ce dernier vis-à-vis les capteurs THL et THR (voir la figure [H.10](#)).

⚠ **ATTENTION** : Il faut toujours s'assurer que le papier sablé est adéquatement trempé avant d'effectuer une séquence de prépolissage. Si ce n'est pas le cas, il y a de fortes chances que le papier reste coincé entre l'échantillon et le plateau durant l'opération.

## H.7 Préparation pour le polissage

La séquence de polissage a principalement deux rôles : réaliser l'enlèvement de matière et réaliser le fini de surface pour la métallographie. Pour préparer la station de polissage dans le but d'exécuter une séquence de polissage, suivez la procédure suivante :

1. Actionnez le bouton pour élever le support pneumatique : **Polishing** → **General** → **Polishing tray** → **On** ;
2. Vérifiez que rien ne gêne le plateau de polissage et retirez la matière d'œuvre si présente ;
3. Nettoyez rigoureusement la surface du plateau, le support de maintien ainsi que les embouts d'égouttement d'abrasif et de lubrifiant (POL-ABR et POL-LUB) avant d'installer un drap (voir la figure [H.10](#)) ;

☞ Vous pouvez utiliser l'eau de la station pour mouiller la surface du disque tournant.

4. Installez la combinaison du drap et liquide abrasif désirée (p. ex. 0.25 ou 3  $\mu\text{m}$ ) [voir les figures [H.10](#) et [H.11](#)] :
  - 4.1. Retirez le tube présent à l'embout d'écoulement d'abrasif POL-ABR ;
  - 4.2. Nettoyez les embouts POL-ABR ;
  - 4.3. Changez le tube de liquide abrasif de la pompe d'abrasif (MTR-4) ;
  - 4.4. Insérez le tube à l'embout ;
  - 4.5. Vérifiez que le tube atteint bien le fond du contenant de liquide abrasif et qu'il y a suffisamment de liquide pour les prochains cycles ;
  - 4.6. Mouillez légèrement la surface du plateau de polissage avec de l'eau pour que le tapis puisse mieux adhérer au plateau ;
  - 4.7. Placez le drap et insérez l'attache de fixation ;
5. Vérifiez également que le contenant de lubrifiant est suffisamment rempli pour l'expérience et que le tube de lubrifiant est adéquatement installé ;
6. Démarrer le plateau de polissage ;

☞ Si le tapis est neuf ou sec, ajoutez manuellement une bonne quantité de lubrifiant pour qu'il soit bien humecté. Ajoutez également quelques centilitres d'abrasif à l'aide d'une seringue.

7. Démarrez les pompes péristaltiques (MTR-3 et MTR-4) à leurs vitesses maximales jusqu'à ce que les liquides s'écoulent des embouts : **Polishing** → **General** → **Peristaltic Pumps** → **Start** ;
8. Arrêtez les pompes et le plateau de polissage ;
9. Modifiez et chargez les paramètres de polissage au besoin (**Polishing**) ;
10. Tournez manuellement le plateau rotatif (POL-PLRO) du support pneumatique pour aligner les deux entailles de ce dernier vis-à-vis les capteurs THL et THR (voir la figure [H.10](#)).

☞ **IMPORTANT** : Évitez de mélanger les tubes et les contenants de liquides d'abrasif. Il est très important de ne pas mélanger les produits, car une contamination des draps ou des tubes réduirait la qualité du fini de surface et par conséquent réduire la qualité de la caractérisation.

## H.8 Mise hors route du Métallographe 3D

1. Terminez toutes opérations en cours avec l'équipement ;

2. Retirez le porte-échantillon de la pince de préhension, suivre la procédure [H.5.1](#) au besoin ;
3. Sauvegardez vos données et votre session ;
4. Fermez les applications de contrôle (PLC, PC et Robot) :
  - 4.1. Fermez le contrôleur robot en appuyant sur le bouton rouge **OFF** du panneau opérateur robot (RJ3-OP) ;
  - 4.2. Éteignez l'ordinateur embarqué (PLC) proprement :
    - 4.2.1. Démarrer → Alimentation → Arrêter ;
    - 4.2.2. Attendez que l'ordinateur soit complètement éteint, c'est-à-dire lorsque le message « Safe to turn off computer » s'affiche ;
5. Débranchez et rangez les câbles de communication du PC ;
6. Désengagez le sectionneur principal d'alimentation (DISC-1). Les voyants lumineux clairs s'éteignent et la pression pneumatique se libère ;
7. Fermez la valve principale d'alimentation en eau (WV-1) ;
8. Retirez la clé du sélecteur de mode à la station de boutons (PBE6) ;
9. Désengagez les sources d'énergie externes ;
10. Cadenassez l'équipement selon la procédure définie par le milieu ou groupe responsable de l'équipement ;
11. Videz la cuve de rétention si celle-ci n'est pas vide ;
12. Nettoyez les stations pour une prochaine utilisation.

## H.9 Photos et indications



Figure H.1 Cabinet électrique de puissance et sectionneur d'alimentation principale du Métallographe 3D



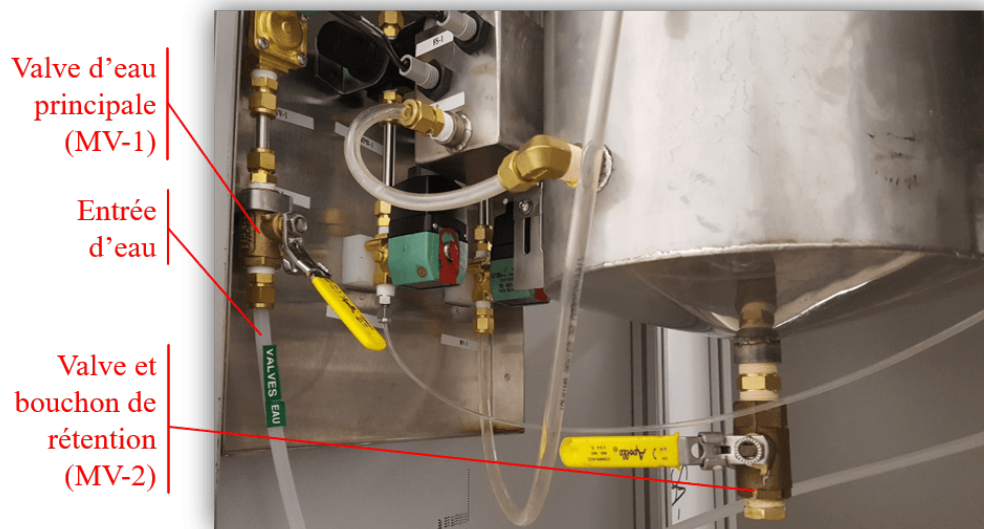


Figure H.2 Unité principale d'alimentation et distribution en eau

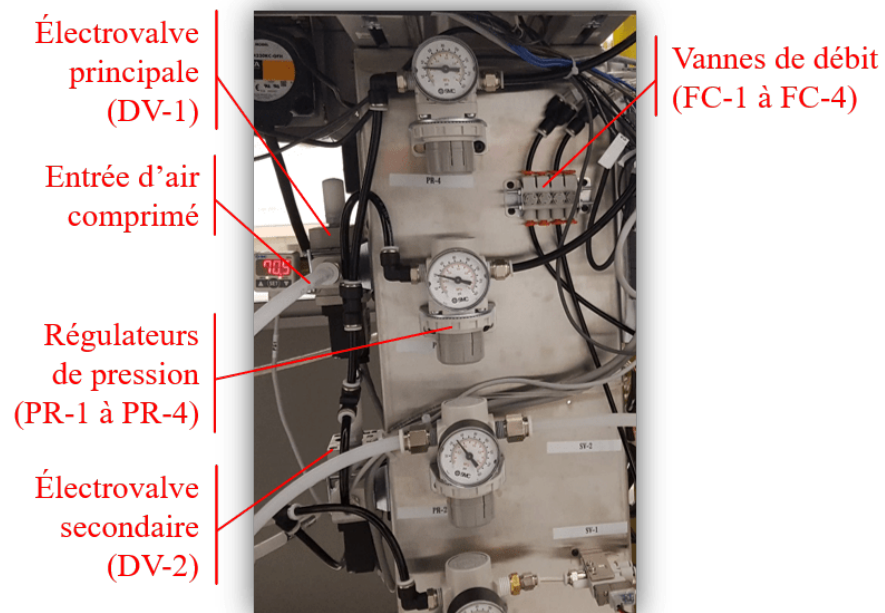


Figure H.3 Unité principale d'alimentation et distribution en air comprimé





Figure H.4 Station à six boutons



(a) Station A

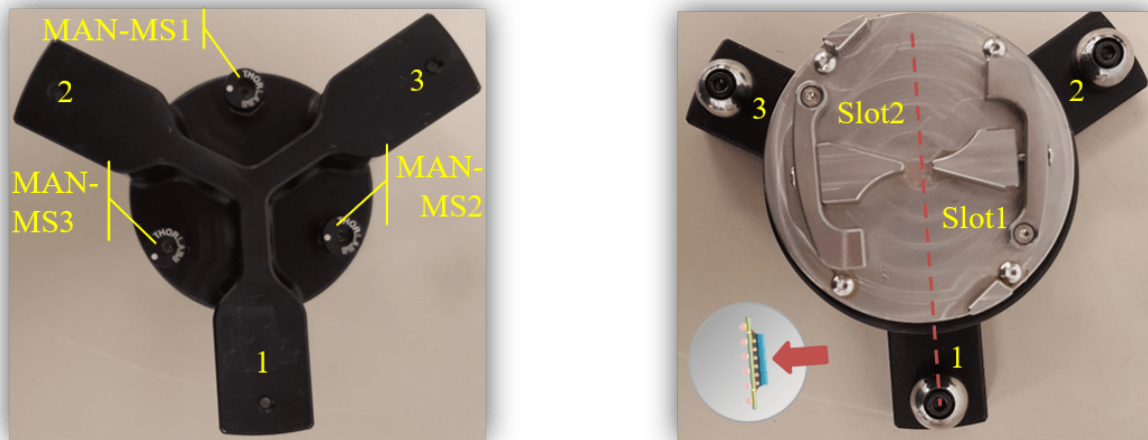


(b) Station B

Figure H.5 Stations à trois boutons



Figure H.6 Cabinet opérateur et terminal de programmation du contrôleur R-J3 de Fanuc



(a) Vue du dessus

(b) Vue du dessous

Figure H.7 Différentes vues et indications du porte-échantillon

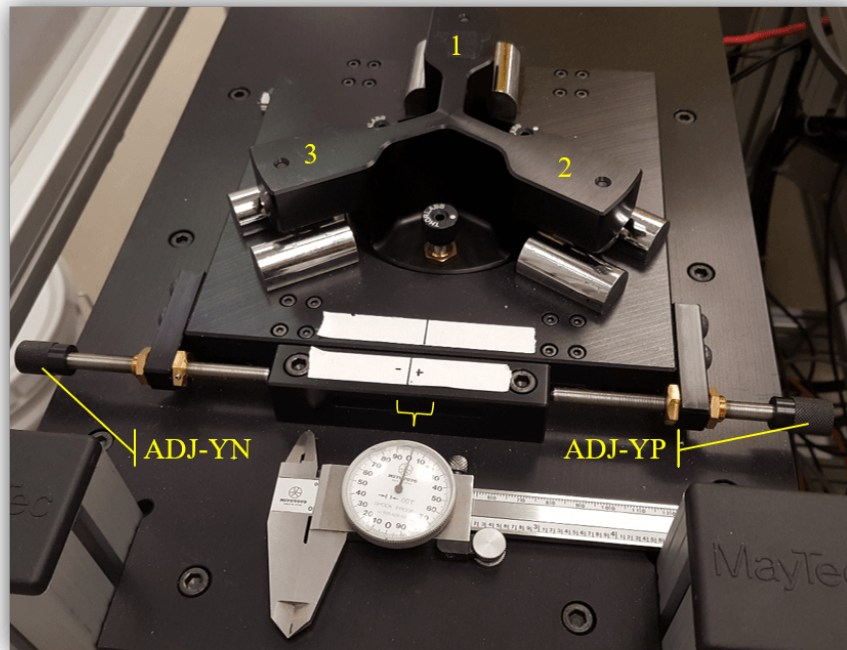


Figure H.8 Porte-échantillon à la station de caractérisation pour l'ajustement de l'axe Y

```

<?xml version="1.0"?>
<ParametersInfo xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <SampleHolder>
    <WorkingSlot>Slot2</WorkingSlot>
    <InitialSampleLength>23.24</InitialSampleLength>
  </SampleHolder>
  <Acquisition>
    <Samples>
      <MetallographySampleInfo>
        <POIs>
          <X>39.1473</X>
          <Y>0</Y>
        </POIs>
        <StackInfo>
          <StackAcquisitionInfo>
            <PolarizationAngles>
              <PolarizerAngle>70</PolarizerAngle>
              <AnalyzerAngle>15</AnalyzerAngle>
            </PolarizationAngles>
            <CameraSettings>
              <Exposure>23</Exposure>
            </CameraSettings>
          </StackAcquisitionInfo>
          <StackAcquisitionInfo>
            <PolarizationAngles>
              <PolarizerAngle>45</PolarizerAngle>
              <AnalyzerAngle>185</AnalyzerAngle>
            </PolarizationAngles>
            <CameraSettings>
              <Exposure>35</Exposure>
            </CameraSettings>
          </StackAcquisitionInfo>
        </StackInfo>
        <Probing>
          <NumberOfSamplePerProbingTarget>1</NumberOfSamplePerProbingTarget>
          <ProbeValueTargets>
            <double>0.25</double>
          </ProbeValueTargets>
          <Strategy>Default</Strategy>
        </Probing>
      </MetallographySampleInfo>
    </Samples>
  </Acquisition>
  <Polishing>
    <GrindTimeMs>10000</GrindTimeMs>
    <PolishTimeMs>30000</PolishTimeMs>
    <StartingAngleOffset>0</StartingAngleOffset>
    <RotationAngleCWOffset>135</RotationAngleCWOffset>
    <RotationAngleCCWOffset>0</RotationAngleCCWOffset>
    <RobotWristRotationSpeed>50</RobotWristRotationSpeed>
  </Polishing>
  <Cleaning>
    <WashTimeMs>10000</WashTimeMs>
    <RinseTimeMs>10000</RinseTimeMs>
    <DryTimeInsideTubMs>15000</DryTimeInsideTubMs>
    <DryTimeOutsideTubMs>40000</DryTimeOutsideTubMs>
  </Cleaning>
  <Handling>
    <MicroscopePickOffset>4.32</MicroscopePickOffset>
  </Handling>
</ParametersInfo>

```

Figure H.9 Exemple d'un fichier de paramètres métallographiques



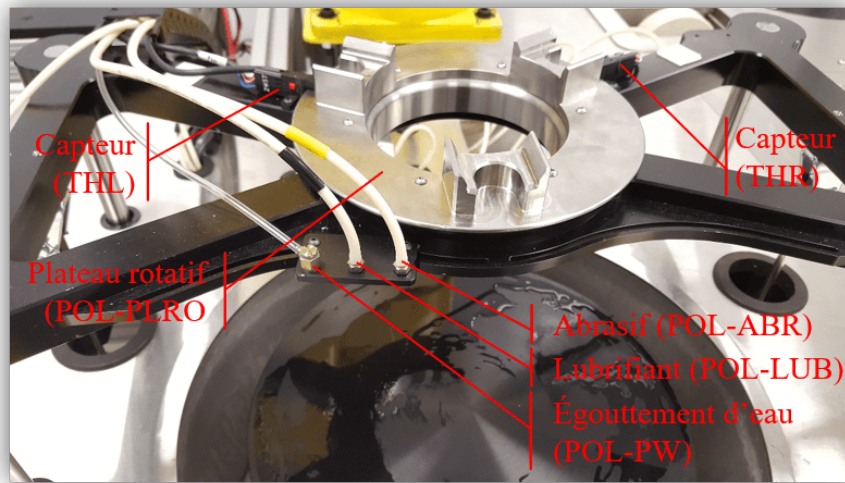


Figure H.10 Effecteurs de liquide de la station de préparation de surface

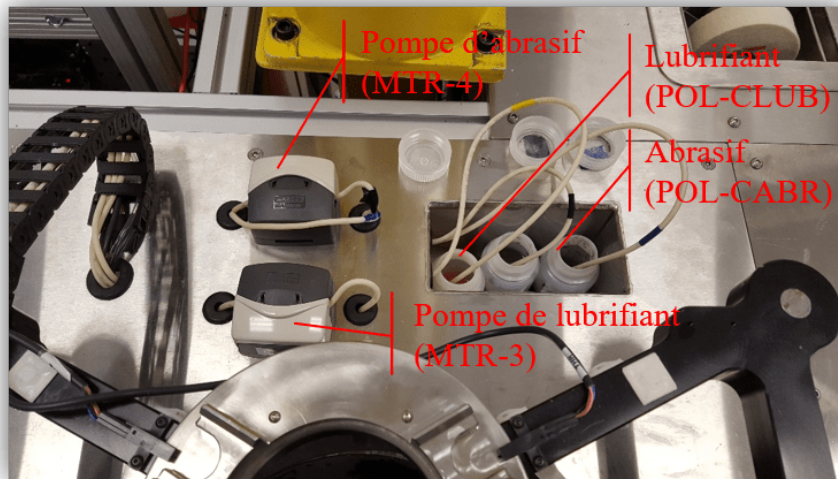


Figure H.11 Contenants de liquide de polissage de la station de préparation de surface

# LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] M. Abtew et G. Selvaduray, « Lead-free solders in microelectronics », *Materials Science and Engineering R : Reports*, t. 27, n° 5, p. 95-141, 2000.
- [2] H. Ma et J. C. Suhling, « A review of mechanical properties of lead-free solders for electronic packaging », *Journal of Materials Science*, t. 44, n° 5, p. 1141-1158, 2009.
- [3] D. A. Shnawah, M. F. M. Sabri et I. A. Badruddin, « A review on thermal cycling and drop impact reliability of SAC solder joint in portable electronic products », *Microelectronics Reliability*, t. 52, n° 1, p. 90-99, 2012.
- [4] anysilicon. (2017). « FlipChip Package Overview », [En ligne]. Disponible : <https://anysilicon.com/flipchip-package-overview/>.
- [5] H. Lavoie, M. C. Paquet, J. Sylvestre, S. Ouimet, E. Duchesne, S. Barbeau, M. Gauvin et V. Oberson, « From leaded to lead free assembly and new packaging technology challenges », *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, p. 1333-1339, 2007.
- [6] T. R. Bieler, H. Jiang, L. P. Lehman, T. Kirkpatrick, E. J. Cotts et B. Nandagopal, « Influence of Sn grain size and orientation on the thermomechanical response and reliability of Pb-free solder joints », *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, t. 31, n° 2 SPEC. ISS. P. 370-381, 2008.
- [7] J. Sylvestre et A. Blander, « Large-scale correlations in the orientation of grains in lead-free solder joints », *Journal of Electronic Materials*, t. 37, n° 10, p. 1618-1623, 2008.
- [8] J. Sylvestre, A. Blander, V. Oberson, E. Perfecto et K. Srivastava, « The impact of process parameters on the fracture of device structures during chip joining on organic laminates », dans *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, Lake Buena Vista, FL, USA : IEEE, 2008, p. 82-88.
- [9] R. S. Sidhu et N. Chawla, « Microstructure characterization and creep behavior of Pb-Free Sn-rich solder alloys : Part I. Microstructure characterization of bulk solder and solder/copper joints », *Metallurgical and Materials Transactions A*, t. 39, n° 2, p. 340-348, 2008.
- [10] R. S. Sidhu, X. Deng et N. Chawla, « Microstructure characterization and creep behavior of Pb-Free Sn-rich solder alloys : Part II. Creep behavior of bulk solder and solder/copper joints », *Metallurgical and Materials Transactions A*, t. 39, n° February, p. 349-362, 2008.
- [11] A. Ayari-Kanoun, V. Oberson, I. Paquin, C. Fortin, R. Fontaine, D. Danovitch et D. Drouin, « Study of influential parameters for lead-free flip chip solder joint cracking », *EMPC 2013 - European Microelectronics Packaging Conference : The Winning Roads of Electronics Packaging*, p. 1-5, 2013.
- [12] S. Wiese, M. Roellig, M. Mueller, S. Bennemann, M. Petzold et K. Wolter, « The size effect on the creep properties of SnAgCu-Solder alloys », dans *Electronic Components and Technology Conference*, Reno, NV, USA : IEEE, 2007, p. 548-557.
- [13] B. Arfaei, Y. Xing, J. Woods, J. Wolcott, P. Tumne, P. Borgesen et E. Cotts, « The effect of Sn grain number and orientation on the shear fatigue life of SnAgCu sol-

- der joints », dans *Electronic Components and Technology Conference*, IEEE, 2008, p. 459-465.
- [14] B. Arfaei, T. Tashtoush, N. Kim, L. Wentlent, E. Cotts et P. Borgesen, « Dependence of SnAgCu solder joint properties on solder microstructure », dans *Electronic Components and Technology Conference*, IEEE, 2011, p. 125-132.
- [15] L. Lehman, R. Kinyanjui, J. Wang, Y. Xing, L. Zavalij, P. Borgesen et E. Cotts, « Microstructure and Damage Evolution in Sn-Ag-Cu Solder Joints », dans *Proceedings Electronic Components and Technology*, Lake Buena Vista, FL : IEEE, 2005, p. 674-681.
- [16] M. Krause, M. Muller, M. Petzold, S. Wiese et K.-J. Wolter, « Scaling effects on grain size and texture of lead free interconnects — Investigations by Electron backscatter diffraction and nanoindentation », *58th Electronic Components and Technology Conference*, p. 75-81, 2008.
- [17] B. Arfaei, F. Mutuku, R. Coyle, E. Cotts et J. Wilcox, « Failure mechanism and microstructural evolution of Pb-free solder alloys in thermal cycling tests : Effect of solder composition and Sn grain morphology », dans *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, IEEE, 2015, p. 118-126.
- [18] M. Mueller, S. Wiese et K. J. Wolter, « Effects of composition and volume on the microstructure of SnAgCu solder balls », *Proceedings 2nd Electronics Systemintegration Technology Conference*, t. 49, n° 0, p. 749-755, 2008.
- [19] Garou, Phil. (2015). « IFTLE 247 ECTC part 3 : More Thermo Compression Bonding from Intel and ASM », [En ligne]. Disponible : <https://sst.semiconductor-digest.com/insights-from-leading-edge/2015/07/iftle-247-ectc-part-3-more-thermo-compression-bonding-from-intel-and-asm/>.
- [20] D. L. Demers, « Conception et fabrication d'un tomographe optique et caractérisation d'un porte échantillon à répétabilité de positionnement submicronique », Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 2018, p. 117.
- [21] C. Cazaubon, G. Gramacia et G. Massard, *Management de projet technique : méthodes et outils*. Sér. Technosup. Ellipses / éd. marketing S.A, 1997.
- [22] P. O. J. Kaltjob, *Mechatronic Systems and Process Automation : Model-Driven Approach and Practical Design Guidelines*. CRC Press, 2018.
- [23] S. Millett et N. Tune, *Patterns, Principles, and Practices of Domain-Driven Design*. Wrox, 2015.
- [24] J. C. Russ et R. T. Dehoff, « Three-dimensional imaging », dans *Practical Stereology*, Boston, MA : Springer US, 2000, chap. 15, p. 345-365.
- [25] J. J. Friel, *Practical Guide to Image Analysis*. Materials Park, OH : ASM international, 2000.
- [26] G. Spanos, « Foreword : Scripta Materialia Viewpoint set on 3D characterization and analysis of materials », *Scripta Materialia*, t. 55, n° 1, p. 3, 2006.
- [27] M. D. Uchic, M. A. Groeber et A. D. Rollett, « Automated serial sectioning methods for rapid collection of 3-D microstructure data », *Jom*, t. 63, n° 3, p. 25-29, 2011.
- [28] S. Bargmann, B. Klusemann, J. Markmann, J. E. Schnabel, K. Schneider, C. Soyarslan et J. Wilmers, « Generation of 3D representative volume elements for heterogeneous materials : A review », *Progress in Materials Science*, t. 96, p. 322-384, 2018.
-

- [29] M. K. Miller et R. G. Forbes, « Atom probe tomography », *Materials Characterization*, t. 60, n° 6, p. 461-469, 2009.
  - [30] M. K. Miller, T. F. Kelly, K. Rajan et S. P. Ringer, « The future of atom probe tomography », *Materials Today*, t. 15, n° 4, p. 158-165, 2012.
  - [31] M. K. Miller et R. G. Forbes, « The local electrode atom probe », dans *Atom-Probe Tomography*, Springer, 2014, p. 229-258.
  - [32] M. Uchic, M. Groeber, M. Shah, P. Callahan, A. Shiveley, M. Scott, M. Chapman et J. Spowart, « An automated multi-modal serial sectioning system for characterization of grain-scale microstructures in engineering materials », dans *Proceedings of the 1st International Conference on 3D Materials Science*, M. De Graef, H. F. Poulsen, A. Lewis, J. Simmons et G. Spanos, éd., Cham : Springer International Publishing, 2012, p. 195-202.
  - [33] M. P. Echlin, M. Straw, S. Randolph, J. Filevich et T. M. Pollock, « Materials characterization the TriBeam system : Femtosecond laser ablation in situ SEM », *Materials Characterization*, t. 100, p. 1-12, 2015.
  - [34] M. D. Uchic, M. A. Groeber, D. M. Dimiduk et J. P. Simmons, « 3D microstructural characterization of nickel superalloys via serial-sectioning using a dual beam FIB-SEM », *Scripta Materialia*, t. 55, n° 1 SPEC. ISS. P. 23-28, 2006.
  - [35] Y. Bhandari, S. Sarkar, M. Groeber, M. D. Uchic, D. M. Dimiduk et S. Ghosh, « 3D polycrystalline microstructure reconstruction from FIB generated serial sections for FE analysis », *Computational Materials Science*, t. 41, n° 2, p. 222-235, 2007.
  - [36] T. L. Burnett, R. Kelley, B. Winiarski, L. Contreras, M. Daly, A. Gholinia, M. G. Burke et P. J. Withers, « Large volume serial section tomography by Xe Plasma FIB dual beam microscopy », *Ultramicroscopy*, t. 161, p. 119-129, 2016.
  - [37] O. Lukason et T. Vissak, « Three-dimensional reconstruction of compacted graphite in vermicular cast iron by manual serial sectioning », *Revista Escola de Minas*, t. 69, n° 1, p. 67-74, 2016.
  - [38] L. Jiang, N. Chawla, M. Pacheco et V. Noveski, « Three-dimensional (3D) microstructural characterization and quantification of reflow porosity in Sn-rich alloy/copper joints by X-ray tomography », *Materials Characterization*, t. 62, n° 10, p. 970-975, 2011.
  - [39] P. Reischig, A. King, L. Nervo, N. Vigano, Y. Guilhem, W. J. Palenstijn, K. J. Batenburg, M. Preuss et W. Ludwig, « Advances in X-ray diffraction contrast tomography : Flexibility in the setup geometry and application to multiphase materials », *Journal of Applied Crystallography*, t. 46, n° 2, p. 297-311, 2013.
  - [40] J. Bertheau, P. Bleuet, F. Hodaj, P. Cloetens, N. Martin, J. Charbonnier et N. Hottelier, « Reflow processes in micro-bumps studied by synchrotron X-ray projection nanotomography », *Microelectronic Engineering*, t. 113, p. 123-129, 2014.
  - [41] P. A. Midgley et M. Weyland, « 3D electron microscopy in the physical sciences : The development of Z-contrast and EFTEM tomography », *Ultramicroscopy*, t. 96, n° 3-4, p. 413-431, 2003.
  - [42] I. Arslan, E. A. Marquis, M. Homer, M. A. Hekmaty et N. C. Bartelt, « Towards better 3-D reconstructions by combining electron tomography and atom-probe tomography », *Ultramicroscopy*, t. 108, n° 12, p. 1579-1585, 2008.
-

- [43] E. N. Landis et D. T. Keane, « X-ray microtomography », *Materials Characterization*, t. 61, n° 12, p. 1305-1316, 2010.
  - [44] M. D. Uchic, « Serial sectioning methods for generating 3D characterization data of grain-and precipitate-scale microstructures », dans *Computational Methods for Microstructure-Property Relationships*, S. Ghosh et D. Dimiduk, éd., 1<sup>re</sup> éd., Springer US, 2011, chap. 2, p. 31-52.
  - [45] S. N. Monteiro et S. Paciornik, « From historical backgrounds to recent advances in 3D characterization of materials : An overview », *Jom*, t. 69, n° 1, p. 84-92, 2017.
  - [46] Y. Adachi, N. Sato, M. Ojima, M. Nakayama et Y.-T. Wang, « Development of fully automated serial-sectioning 3D microscope and topological approach to pearlite and dual-phase microstructure in steels », dans *Proceedings of the 1st International Conference on 3D Materials Science*, M. De Graef, H. F. Poulsen, A. Lewis, J. Simmons et G. Spanos, éd., Cham : Springer International Publishing, 2016, p. 37-42.
  - [47] D. B. Murphy et M. W. Davidson, *Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging*, 2<sup>e</sup> éd. Hoboken, New Jersey : Wiley-Blackwell, a John Wiley & Sons, Inc., 2013, p. 538.
  - [48] M. W. D. Robinson, Philip C., *Polarized Light Microscopy*, 2017.
  - [49] Centre de Collaboration MiQro Innovation (C2MI). (2020). « L’Innovation réinventée », [En ligne]. Disponible : <https://www.c2mi.ca/c2mi/le-centre/>.
  - [50] Beckhoff Automation GmbH & Co. (2020). « Beckhoff Information System - English », [En ligne]. Disponible : [https://infosys.beckhoff.com/index\\_en.htm](https://infosys.beckhoff.com/index_en.htm).
  - [51] Joris Van Damme. (2020). « TIFF Tag Reference, Baseline TIFF Tags », [En ligne]. Disponible : <https://www.awaresystems.be/imaging/tiff/tifftags/baseline.html>.
  - [52] Modbus Organization, Inc. (2020). « Modbus Technical Resources », [En ligne]. Disponible : <http://www.modbus.org/tech.php>.
  - [53] FANUC America Corporation, « FANUC Robotics Sytem R-J3iB HandlingTool setup and operations manual », Training Departement, 3900 W. Hamlin Road, Rochester Hills, MI 48309, USA, rapp. tech. REV E, 2015, p. 2121.
  - [54] F. Cristian, « Probabilistic clock synchronization », *Distributed computing*, t. 3, n° 3, p. 146-158, 1989.
-